



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Insertión proximal y distal del músculo semimembranoso: estudio ecográfico, anatómico e histológico con finalidad diagnóstica y clínica

Pedro Iglesias Chamorro

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) i a través del Dipòsit Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX ni al Dipòsit Digital de la UB. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX o al Dipòsit Digital de la UB (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) y a través del Repositorio Digital de la UB (diposit.ub.edu) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR o al Repositorio Digital de la UB. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR o al Repositorio Digital de la UB (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service and by the UB Digital Repository (diposit.ub.edu) has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized nor its spreading and availability from a site foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service or to the UB Digital Repository is not authorized (framing). Those rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



UNIVERSITAT^{DE}
BARCELONA

INSERCIÓN PROXIMAL Y DISTAL DEL MÚSCULO SEMIMEMBRANOSO: ESTUDIO ECOGRÁFICO, ANATÓMICO E HISTOLÓGICO CON FINALIDAD DIAGNÓSTICA Y CLÍNICA.

Memoria de tesis doctoral presentada por
PEDRO IGLESIAS CHAMORRO
para optar al grado de doctor por la Universitat de Barcelona.

Dirigida y tutorizada por

Dra. MARIBEL MIGUEL PÉREZ

Unidad de Anatomía y Embriología. Departamento de Patología y Terapéutica Experimental.
Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud (Campus de Bellvitge). Universitat de Barcelona.

y

Dr. ALBERT PÉREZ BELLMUNT

Área de Estructura y Función del Cuerpo Humano. Departamento de Medicina.
Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud. Universitat Internacional de Catalunya.

PROGRAMA DE DOCTORADO:

Medicina e Investigación Traslacional

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Fisiopatología de las Enfermedades Medicoquirúrgicas.

Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud - Campus de Bellvitge -. Universitat de Barcelona.

DICIEMBRE 2024

A Diego, mi padre:
Mi referencia, mi modelo a seguir. Mi orgullo.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis es el fruto de muchas horas de trabajo, individual y compartido, de muchos ratos libres robados al minuterero, de mucho esfuerzo y de mucho cariño, por mi parte y por quien me rodea.

Quiero agradecer a mis directores de tesis la paciencia que han tenido conmigo, especialmente a la Dra. Miguel-Pérez, por animarme a emprender esta aventura, tomarme de su mano y acompañarme desde entonces, compartiendo conmigo su extensa sabiduría y sus infinitos conocimientos anatómicos, con humildad, haciéndomelo fácil y enseñándome lo que no está escrito (literalmente), y al Dr. Albert Pérez, porque siempre ha aparecido en el momento preciso. Al magnífico equipo que ha estado a mi lado durante el tiempo que ha durado el desarrollo de este trabajo: Dr. Joan Carles Ortiz, Dra. Sara Ortiz, Dra. Íngrid Möller y Dr. Joan Blasi, así como a todos los profesionales que me han prestado ayuda en mi paso por la Sala de Disección de la Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud del campus de Bellvitge, de la Universitat de Barcelona.

A todas las personas que generosamente donaron su cuerpo a la ciencia y me han permitido aprender cosas que nunca hubiera imaginado aprender.

Quiero mencionar, de manera muy especial, a mi amiga Maribel, por su aliento incondicional en todo momento y porque sin su amistad y su generosidad esta tesis no existiría.

Durante los últimos 4 años este trabajo se ha desarrollado en el laboratorio de una universidad y ante el teclado de un ordenador pero tengo claro que este proyecto es el resultado de algo que se empezó a gestar hace muchos, muchos años atrás, posiblemente más de cincuenta, y que ha crecido gracias al apoyo y el cariño de mi núcleo más íntimo y de las personas que conforman mi esencia.

Por eso quiero y estoy muy feliz de poder hacerlo, dar mi agradecimiento más sincero a Diego, mi padre, por haber puesto mis bases y haberme marcado el camino; a Montse, mi madre, por hacerme caminar cuando yo aún no podía hacerlo solo; y a Núria, mi Núria, por allanarme el camino en los momentos críticos, como solo ella sabe hacerlo.

A Ricard, lo mejor que me ha pasado, porque siendo como es me demuestra cada día que el camino que marcó Diego era el camino correcto y ahora es él quien me da ejemplo a mí. Ricard, ets un 10.

Y a Teresa, la mujer de mi vida, por lanzarse a volar conmigo cuando yo ni tan siquiera tenía alas, saltando al vacío, sin red, arriesgándolo todo, y por querer seguir volando juntos desde entonces. Nunca lo olvido. T'estimo.

A todos aquellos que, en un momento u otro de mi vida, se han cruzado en mi camino y me han dado un poquito de su energía para que pudiera dar un pasito más.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento.

FUENTES DE FINANCIACIÓN

Este trabajo de investigación no ha recibido ninguna financiación específica de agencias de financiación en los sectores público, comercial o sin ánimo de lucro.

ÍNDICE

Abreviaturas y acrónimos	9
Enumeración de los artículos de la tesis	10
Resumen de la tesis	11
Castellano	12
Catalán	15
1.- Introducción	18
1.1 El muslo y los músculos isquiosurales	19
1.2 El músculo semimembranoso	20
1.2.1 Anatomía	20
Inserción proximal	20
Inserción distal	21
Ventre muscular y uniones miotendinosas	23
1.2.2 Biomecánica	25
Implicación en la biomecánica de la pelvis	25
Implicación en la biomecánica de la cadera	26
Implicación en la biomecánica de la rodilla	26
1.2.3 Lesiones	36
Lesiones propias	36
En relación con el ligamento cruzado anterior	39
En relación con los meniscos	42
En relación con la columna lumbar	44
Síndrome de los isquiotibiales	47
1.2.4 Estudio del músculo semimembranoso por la imagen	47
Resonancia magnética	47
Ecografía	48
2.- Hipótesis	50
3.- Objetivos	52

4.- Material, métodos y resultados	54
4.1 Artículo 1	55
Resumen del artículo 1	55
Artículo 1	57
4.2 Artículo 2	73
Resumen del artículo 2	73
Artículo 2	75
5.- Discusión	89
6.- Conclusiones	103
7.- Bibliografía	106

ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS

AM: músculo aductor mayor

AMRI: *antero medial rotational instability*

BF: músculo bíceps femoral

CF: músculo cuádriceps femoral

CCBF: cabeza corta del músculo bíceps femoral

CLBF: cabeza larga del músculo bíceps femoral

LCA: ligamento cruzado anterior

LCP: ligamento cruzado posterior

LPO: ligamento poplíteo oblicuo

PAMC: potencial de acción muscular compuesto

PES: potenciales evocados somatosensoriales

RMN: resonancia magnética nuclear

RHB: rehabilitación

SM: músculo semimembranoso

ST: músculo semitendinoso

ARTÍCULOS DE LA TESIS

Tesis en formato de compendio de publicaciones.

La tesis consta de 1 objetivo principal, 6 objetivos secundarios y 2 artículos.

Artículo 1

Autores: Miguel-Pérez, M; **Iglesias-Chamorro, P**; Ortiz-Miguel, S; Ortiz-Sagristà, J.-C; Möller, I; Blasi, J; Agullò, J; Martinoli, C; Pérez-Bellmunt, A.

Título: Anatomical relationships of the proximal attachment of the hamstring muscles with neighboring structures: from ultrasound, anatomical and histological findings to clinical implications.

Revista: Diagnostic.

DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/diagnostics14161725>

Año: 2024 **Volumen:**14 **Páginas:** 1725-1741

Factor de impacto (JCR): 3; Q1; Área Medicine general and interna (59/329)

Artículo 2

Autores: **Iglesias-Chamorro P**, Pérez-Bellmunt A, Ortiz-Miguel S, Möller I, Blasi J, Ortiz-Sagristà J, Martinoli C, Sanjuan X, Miguel-Pérez M.

Título: What is new about the semimembranosus distal tendon? Ultrasound, anatomical, and histological study with clinical and therapeutic application.

Revista: Life (Basel).

DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/life14050631>

Año: 2024 **Volumen:** 15; 14(5) **Páginas:** 631-646

Factor de impacto (JCR): 3,2; Q1; Biology (26/109)

RESUMEN DE LA TESIS

RESUMEN DE LA TESIS

Título: “Inserción proximal y distal del músculo semimembranoso: estudio ecográfico, anatómico e histológico, con finalidad diagnóstica y clínica”.

Antecedentes del tema:

El músculo semimembranoso forma parte del grupo de los músculos isquiosurales y, aunque ya ha sido ampliamente estudiado anatómicamente, la descripción de sus inserciones es aún controvertida. A nivel proximal, se discute si su inserción forma parte o no del tendón conjunto de los músculos semitendinoso y de la cabeza larga del bíceps femoral, cuál es la localización de dicho tendón o cuál es su huella en la tuberosidad isquiática. Por otra parte, la disposición del tendón y sus divisiones en su inserción distal, conocida como pata de ganso profunda, también es motivo de múltiples investigaciones.

La importancia de conocer de manera precisa y exhaustiva la morfología y las relaciones de este músculo se debe a la asociación y descripción de múltiples patologías. Para ello, se ha constatado que la ecografía es una prueba de imagen válida tanto para el diagnóstico como para su manejo. Sin embargo, para la correcta interpretación de las imágenes se precisa un buen conocimiento anatómico del músculo y de las estructuras relacionadas con él.

Hipótesis:

El exhaustivo conocimiento ecográfico, anatómico e histológico del músculo semimembranoso y de sus inserciones proximal y distal facilitaría su identificación e interpretación ecográfica para el posible diagnóstico de lesiones a través de la imagen.

Objetivos:

Estudiar ecográfica, anatómica e histológicamente el músculo semimembranoso, con especial detenimiento en su inserción proximal y distal.

Metodología:

Se han realizado dos estudios anatómicos de carácter transversal descriptivo observacional. El primero ha analizado la inserción proximal del músculo semimembranoso en 97 hemipelvis de 66 especímenes. En el segundo se ha estudiado su inserción distal en 38 rodillas no pareadas de

muestras anatómicas de adultos y 4 rodillas no pareadas de fetos de 29 a 38 semanas de edad. En ambos casos, el estudio se ha realizado en cadáveres donantes, criopreservados a -20°C, de la Sala de Disección de la Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud, campus de Bellvitge, de la Universitat de Barcelona. Para un mejor estudio se inyectaron las arterias con látex (LatexCompound) y posteriormente se realizó primero el estudio ecográfico, anatómico y, en algunos especímenes seleccionados de manera aleatoria, se tomaron muestras histológicas. A nivel estadístico se estudiaron las variables de edad y sexo de los especímenes, la lateralidad de las extremidades inferiores estudiadas y los datos recogidos en diferentes puntos referentes a la anchura, grosor y diámetro del músculo semimembranoso.

Resultados:

El estudio de la inserción proximal del músculo semimembranoso y del resto de los músculos isquiosurales se observó en primer lugar con la ecografía, que detectó su origen en la tuberosidad isquiática, así como una línea hiperecogénica que rodeaba la inserción del músculo semimembranoso y la cabeza larga del músculo bíceps femoral, y otra línea hiperecogénica de menor grosor que desde la tuberosidad isquiática se expandía y cubría el nervio ciático. El estudio anatómico e histológico confirmó los resultados de la ecografía y mostró las diferentes capas que forman el ligamento sacrotuberoso. Por otra parte, permitió observar que la inserción proximal del músculo semimembranoso tiene una localización más superior que el resto de los músculos isquiosurales y que compartía fibras con la cabeza larga del músculo bíceps femoral y el músculo aductor mayor. El análisis histológico también demostró que las líneas hiperecogénicas observadas con ecografía correspondían a tejido conectivo denso y que formaba un retináculo que recubría la porción larga de los músculos bíceps femoral y semimembranoso, así como la expansión que recubre el nervio ciático.

El estudio inicial ecográfico de la inserción distal del músculo semimembranoso facilitó la identificación de las diferentes divisiones del tendón y la rotación del músculo y del tendón distal de medial a posterior. El estudio anatómico confirmó esta rotación y reveló un ancho, espesor y diámetro promedio de 38,29 mm, 14,36 mm y 112,64 mm, respectivamente. Así mismo, durante la disección se observaron relaciones importantes entre las divisiones del tendón principal y el ligamento colateral medial, la parte posterior de la cápsula de la rodilla y el músculo poplíteo.

En ninguno de los dos estudios se obtuvieron resultados con diferencias estadísticamente significativas en lo que respecta a la edad y sexo de los especímenes, ni a la lateralidad de las extremidades estudiadas.

Conclusiones: Este estudio del músculo semimembranoso contribuye a una mejor visualización ecográfica de la inserción proximal y distal del músculo semimembranoso y de sus diferentes relaciones anatómicas. Esto puede ayudar a entender algunas lesiones en dichas inserciones y en las estructuras de alrededor y al mismo tiempo, favorecen y mejoran los protocolos de rehabilitación postquirúrgica de algunas lesiones de estas zonas.

Palabras clave: semimembranoso, isquiosurales, pata de ganso profunda, menisco, ecografía.

RESUMEN DE LA TESIS - (catalán)

Títol: “Inserció proximal i distal del múscul semimembranós: estudi ecogràfic, anatòmic i histològic, amb finalitat diagnòstica i clínica”.

Antecedents del tema:

El múscul semimembranós forma part del grup dels músculs isquiosurals i, tot i que ja ha estat àmpliament estudiat anatòmicament, la descripció de les seves insercions encara és controvertida. A nivell proximal, es discuteix si la seva inserció forma part o no del tendó conjunt dels músculs semitendinosos i del cap llarg del bíceps femoral, quina és la localització d'aquest tendó o quina és la seva petjada en la tuberositat isquiàtica. D'altra banda, la disposició del tendó i les seves divisions en la seva inserció distal, coneguda com a pota d'ànec profunda, també és motiu de múltiples investigacions.

La importància de conèixer de manera precisa i exhaustiva la morfologia i les relacions d'aquest múscul es deu a l'associació i descripció de múltiples patologies. A tal efecte, s'ha constatat que l'ecografia és una prova d'imatge vàlida tant pel diagnòstic com pel seu maneig. Malgrat tot, , per la correcta interpretació de les imatges cal un bon coneixement anatòmic del múscul i de les estructures amb ell relacionades.

Hipòtesi:

L'exhaustiu coneixement ecogràfic, anatòmic i histològic del múscul semimembranós i de les seves insercions proximal i distal facilitaria la seva identificació i interpretació ecogràfica pel possible diagnòstic de lesions mitjançant la imatge.

Objetius:

Estudiar ecogràfica, anatòmica i histològicament el múscul semimembranós, amb especial deteniment en la seva inserció proximal i distal.

Metodologia:

S'han realitzat dos estudis anatòmics de caràcter transversal descriptiu observacional. El primer ha analitzat la inserció proximal del múscul semimembranós en 97 hemipelvis de 66 espècimens. En el segon s'ha estudiat la seva inserció distal en 38 genolls no aparellades de mostres

anatòmiques d'adults i 4 genolls no aparellats de fetus de 29 a 38 setmanes de gestació. En ambdós casos, l'estudi s'ha realitzat en cadàvers donants, criopreservats a -20°C, de la Sala de Dissecció de la Facultat de Medicina y Ciències de la Salut, campus de Bellvitge, de la Universitat de Barcelona. Per a un millor estudi es van injectar les artèries amb làtex (LatexCompound) i posteriorment es va realitzar, en primer lloc, l'estudi ecogràfic, anatòmic i, en alguns espècimens seleccionats de manera aleatòria, es van prendre mostres histològiques. A nivell estadístic es van estudiar les variables d'edat i sexe dels espècimens, la lateralitat de les extremitats inferiors estudiades i les dades recollides en diferents punts referents a l'amplada, gruix i diàmetre del múscul semimembranós.

Resultats:

L'estudi de la inserció proximal del múscul semimembranós i de la resta dels músculs isquiosurals es va observar en primer lloc amb l'ecografia, que va detectar el seu origen en la tuberositat isquiàtica, així com una línia hiperecogènica que envoltava la inserció del múscul semimembranós y el cap llarg del múscul bíceps femoral, i una altra línia hiperecogènica de menor gruix que des de la tuberositat isquiàtica s'expandia y cobria el nervi ciàtic. L'estudi anatòmic i histològic va confirmar els resultats de l'ecografia i va mostrar les diferents capes que formen el lligament sacrotuberós. D'altra banda, va permetre observar que la inserció proximal del múscul semimembranós té una localització més superior que la resta dels músculs isquiosurals i que compartia fibres amb el cap llarg del múscul bíceps femoral i el múscul adductor major. L'anàlisi histològica també va demostrar que les línies hiperecogèniques observades amb ecografia corresponien a teixit connectiu dens i que formava un retinacle que envoltava la porció llarga dels músculs bíceps femoral i semimembranós, així com l'expansió que cobreix el nervi ciàtic.

L'estudi inicial ecogràfic de la inserció distal del múscul semimembranós va facilitar la identificació de les diferents divisions del tendó i la rotació del múscul i del tendó distal de medial a posterior. L'estudi anatòmic va confirmar aquesta rotació i va revelar un ample, gruix i diàmetre mitjans de 38,29 mm, 14,36 mm i 112,64 mm, respectivament. D'altra banda, durant la dissecció es van observar relacions importants entre les divisions del tendó principal i el lligament col·lateral medial, la part posterior de la càpsula del genoll y el múscul popliti.

En cap dels dos estudis van obtenir-se resultats amb diferències estadísticament significatives pel que respecta a l'edat i el sexe dels espècimens, ni a la lateralitat de les extremitats estudiades.

Conclusions: Aquest estudi del múscul semimembranós contribueix a una millor visualització ecogràfica de la inserció proximal i distal del múscul semimembranós i de les seves relacions anatòmiques. Això pot ajudar a entendre algunes lesions en aquestes insercions i en les estructures dels seu voltant i, alhora, afavoreixen i milloren els protocols de rehabilitació postquirúrgica d'algunes lesions d'aquestes zones.

Paraules clau: semimembranós, isquiosurals, pota d'oca profunda, menisc, ecografia.

1.- INTRODUCCIÓN

1.- INTRODUCCIÓN

1.1 El muslo y los músculos isquiosurales

El muslo es la región anatómica comprendida entre la pelvis y la rodilla. Los músculos que lo forman están envueltos por una capa de tejido conectivo denso, llamada fascia lata. Esta estructura anatómica presenta un importante engrosamiento lateral denominado tracto iliotibial, también llamado banda iliotibial o cinta de Maissiat, que se inserta a nivel proximal en la cara anterolateral de la cresta ilíaca y distalmente en el tubérculo de Gerdy de la tibia. La estructura más profunda de la fascia lata da lugar a dos tabiques fasciales intermusculares que separan los músculos del muslo en tres compartimentos: anterior, posterior y medial. El compartimento anterior queda separado del medial por el tabique intermuscular femoral medial, que discurre desde la fascia lata hasta el labio medial de la línea áspera, mientras que el tabique intermuscular femoral lateral, que se extiende desde la fascia lata hasta el labio lateral de la línea áspera, separa al compartimento anterior del compartimento posterior [1,2].

El compartimento anterior contiene a los músculos sartorio, cuádriceps femoral (formado por el músculo recto femoral, el músculo vasto medial, el músculo vasto lateral y el músculo vasto intermedio), que se unen en la zona distal formando el tendón del músculo cuádriceps femoral, y el músculo articular de la rodilla. Todos ellos están inervados por el nervio femoral [1,2].

El compartimento medial contiene a los músculos pectíneos, aductor largo, aductor corto, aductor mayor (AM) y grácil, inervados principalmente por el nervio obturador y también, con menor participación, por ramas de los nervios femoral y ciático [1,2].

El compartimento posterior del muslo contiene a los músculos semimembranoso (SM), semitendinoso (ST) y bíceps femoral (BF), éste último formado por la cabeza larga (CLBF) y la cabeza corta (CCBF). Todos ellos están inervados por el nervio ciático (L5, S1 y S2). El SM, ST y la CLBF lo hacen mediante su división en el nervio tibial, mientras que la CCBF lo está por el nervio peroneo [1–4].

La terminología inglesa define en su conjunto al grupo de músculos formado por el SM, ST y BF como “*hamstrings*” [4–7], mientras que en español recibe el nombre de “músculos isquiosurales” o “músculos isquiocrurales”, cuyo vocablo se deriva de la localización anatómica de sus inserciones proximal y distal [1–3]. Así, se tiene en cuenta que a nivel proximal el SM, la CLBF y el ST se insertan en el hueso isquión, concretamente en la tuberosidad isquiática [1,2], mientras que a nivel distal los tres músculos se insertan en la pierna, entendiéndose ésta como la porción

del cuerpo humano comprendida entre la rodilla y el tobillo y que está envuelta por la fascia crural [1,2].

1.2 El músculo semimembranoso

El SM presenta unas características diferentes a las del ST y la CLBF y su descripción anatómica resulta aún controvertida, tanto en lo que respecta a su inserción proximal [6,8–10] como a su inserción distal [11–14] o a las peculiaridades de su vientre muscular [4,15,16].

1.2.1 Anatomía

Inserción proximal

A nivel proximal, también considerado el origen del músculo, la mayoría de estudios detallan que el SM se inserta en la tuberosidad isquiática mediante un tendón propio y que el ST y la CLBF lo hacen mediante un tendón común [5,8–10,17–22], en ocasiones con expansiones en el ligamento sacrotuberoso [5,10]. Algunos autores, además de remarcar que el tendón del SM es claramente independiente al tendón común del ST y de la CLBF, describen que en él pueden diferenciarse dos grupos de fibras, orientadas en dos direcciones diferentes antes de que se combinen para formar un único tendón grueso en la parte distal de la tuberosidad isquiática: el primer grupo de fibras, y más mayoritario, se dirige verticalmente hacia el tendón del músculo mientras que el segundo se dirige hacia la parte posterior de dicho tendón [10]. Esta doble orientación es exclusiva del SM y no está presente en el origen proximal de la CLBF ni en el del ST y esto ha llevado a algunos autores a hipotetizar que esta doble orientación de fibras podría permitir una mayor tolerancia a la tracción por parte del extremo proximal y ser uno de los motivos que minimiza el porcentaje de lesiones del SM en comparación con la CLBF [23].

Entre los autores que describen la independencia del tendón proximal del SM con respecto al tendón común del ST y de la CLBF muchos también difieren en su exacta localización [9]. Unos lo ubican en una posición anterolateral al tendón conjunto del ST y de la CLBF [5,9,10,17,22,24,25], otros superolateral [4,5,7,26], otros anteromedial [27], otros puramente anterior [28] y algunos en una localización puramente lateral [10,19,20].

Por otra parte, también difiere la descripción de la forma de la huella de inserción de los tendones de estos músculos en dicha tuberosidad [8,19,29]. Mientras para unos tiene una huella de forma ovalada con una inserción común del tendón del ST y de la CLBF y una huella separada, en forma de media luna, para el SM [19,30], para otros existe una huella común para el tendón

del ST y el de la CBLF en forma de media luna y una huella del tendón del SM circular y separada de la anterior [29].

Desde su inserción proximal el tendón del SM se continua distalmente, desciende en una posición anterior y medial al ST y a la CBLF [26] y se ensancha formando una membrana plana, ancha y aponeurótica, a la que éste le debe su nombre [1,4]. A medida que el tendón avanza hacia distal es más grueso y redondeado en su borde lateral y se aplana en una fina membrana medialmente. Antes de terminar en una lámina ancha, su trayectoria hace una torsión gradual hacia posterior dejando de estar colocado en un único plano y colocándose en una dirección anteroposterior, en el plano sagital [5]. De esta porción aponeurótica se originan las fibras musculares. Las fibras posteriores del tendón del SM dan lugar al borde lateral, mientras que las fibras anteriores realizan un giro en espiral para acabar formando su parte membranosa interna [31]. Esta torsión hace sugerir en algunas investigaciones que el tendón y el vector resultante de las fuerzas que transmite no estén en línea, lo que le otorga unas características biomecánicas peculiares [24].

Este tendón proximal del SM tiene conexiones con el tendón del AM y el origen de la CLBF [26] y el hecho de que la porción lateral se extienda distalmente en la cara posterior del muslo [5] comporta que sea el tendón más largo de los músculos isquiosurales [32], comprendiendo aproximadamente el 75% de la longitud total del complejo miotendinoso del SM [33,34].

Inserción distal

La inserción distal del SM forma la totalidad de la pata de ganso profunda (a diferencia de la pata de ganso superficial, compuesta por las inserciones de los músculos sartorio, grácil y semitendinoso [1]) y tiene lugar en forma de 3 tendones principales, formados a partir de un tendón grueso, cuyas porciones más significativas son el tendón directo, el tendón reflejo y el tendón recurrente [1].

Una vez divididos desde el tendón principal, el tendón directo continúa distalmente en la misma dirección del músculo y se inserta en la cara posterior del cóndilo medial de la tibia; el tendón reflejo se dirige hacia la parte superior y anterior del cóndilo medial de la tibia, pasando bajo el ligamento colateral tibial, y el tendón recurrente se dirige a la cara posterior del cóndilo lateral del fémur, uniéndose a la parte posterior de la cápsula articular, formando el ligamento poplíteo oblicuo (LPO) de la rodilla [1]. A través de este ligamento el SM puede tensar la parte posterior de la cápsula articular de la rodilla y evitar su pinzamiento durante el movimiento de flexión [2],

a semejanza de lo que hace su antagónico, el músculo subcrural o músculo articular de la rodilla, cuyas fibras separadas del músculo cuádriceps femoral terminan en el borde superior de la bolsa suprarotuliana y tiran de la parte anterior de la cápsula articular en el movimiento de extensión de la rodilla, tensando la estructura y evitando su pinzamiento [2,3].

A partir de estos 3 tendones de inserción constante del SM, la mayoría de autores describen cinco porciones tendinosas [4,12,35–40], pero hay quien llega a detallar seis [11,41] e, incluso, ocho divisiones [42], que tienen características histológicas heterogéneas [43,44], diferente desarrollo embrionario [45,46] y que, en su inserción, se relacionan con múltiples estructuras anatómicas [11,12,35–38,41,42,44].

Aunque los textos clásicos lo dividen en tres tendones distales, la división más utilizada es de cinco tendones (la porción anterior o tibial, la porción directa, la porción inferior o poplítea, la porción capsular y el ligamento poplíteo oblicuo de la rodilla) basándose en exploraciones anatómicas realizadas en cadáver y, sobre todo, en los hallazgos obtenidos mediante imágenes de resonancia magnética nuclear (RMN) [12]. Estos estudios exponen que la porción anterior (también conocida como porción tibial, o tendón reflejo) es una estructura con un grosor que varía significativamente entre las diferentes muestras estudiadas y que se extiende anteriormente, pasando bajo el ligamento oblicuo posterior y se inserta en la zona medial de la parte proximal de la tibia, bajo el ligamento colateral tibial. Mediante RMN, esta porción es extraño verla como una estructura separada, sino que es más frecuente encontrarla como una extensión anterior unida al complejo tendinoso distal del SM y que se alinea con el eje longitudinal del SM cuando la rodilla está en flexión. Respecto a la porción directa, detallan que también tiene un recorrido anterior pero, en este caso, más profunda a la porción anterior y que se inserta en una zona más posteriomedial de la tibia. En relación a la porción inferior o poplítea, describen que se extiende más distalmente que las porciones o tendones anterior y directo y que pasa por debajo de los segmentos tibiales distales del ligamento oblicuo posterior y el ligamento colateral tibial, insertándose justo por encima de la inserción tibial del ligamento colateral tibial [12]. La proximidad que se establece entre el ligamento colateral tibial, más superficial, y los fascículos directo, anterior e inferior, en una posición más profunda, no implica que estén entrelazados [12]. Es importante mencionar también que entre el ligamento colateral tibial y estas porciones tendinosas del SM se encuentra una bursa con forma de U o de J que tiene rasgos morfológicos característicos cuando estas estructuras están inflamadas [47–49].

Por su parte, la porción o tendón capsular es contigua al ligamento poplíteo oblicuo, que puede verse como una extensión lateral delgada y ancha del tendón del SM, que cubre y se fusiona con la cápsula posteriomedialmente, se extiende más allá de la línea media de la articulación para entrelazar sus fibras con el ligamento arqueado, en la parte posterolateral de la rodilla [12].

Los autores que describen más de cinco inserciones, se refieren a prolongaciones inconstantes de inserción en el cuerno posterior del menisco lateral [41] y otros en el interior de la aponeurosis del músculo poplíteo [12].

La particularidad anatómica de estas múltiples inserciones a través de la pata de ganso profunda comporta que el conjunto miotendinoso distal del SM tenga una gran importancia dentro del complejo articular de la rodilla, no solo por su acción estabilizadora [9,11,12,42,50–52] y su implicación a nivel propioceptivo [35,43,53,54], sino también por las consecuencias que comporta una tracción excesiva de alguno de sus tendones de inserción sobre las estructuras anatómicas con las que se relaciona [37,39,55,56].

Ventre muscular y uniones miotendinosas

El SM es el músculo más largo de todos los que ocupan el compartimento posterior del muslo [32]. Además de las variaciones anatómicas y las diferencias de criterio descritas en sus inserciones proximales y distales, la descripción completa del músculo al completo también es dispar. Su vientre muscular varía considerablemente de tamaño y en ocasiones puede ser inexistente [57] o encontrarse doble [4,15,16].

Desde su inserción proximal el tendón avanza distalmente en una posición anterior y medial al tendón conjunto del ST y de la CLBF [26], realiza una torsión gradual hacia posterior y se aplana formando una lámina ancha en forma de membrana que se orienta en el plano coronal [5,24]. Después se ensancha y se vuelve aponeurótico y la porción lateral se extiende más distalmente en la cara posterior del muslo hasta un punto distal en el centro del vientre muscular [5].

Los fascículos musculares surgen del borde medial del tendón proximal, aproximadamente a la altura de la mitad del muslo [33], con lo que el tendón tiene un importante recorrido intramuscular. Distalmente, dichos fascículos musculares se componen principalmente de numerosas fibras cortas unipennadas y multipennadas, lo que maximiza el número de fibrillas musculares por unidad de área [26], y adoptan una disposición oblicua inferior y medial [58]. Cabe considerar que las características de las relaciones arquitectónicas que se establecen entre los músculos isquiosurales afectan a la contribución de cada uno de ellos a la fuerza total del

grupo y que su propia arquitectura, vista de manera individualizada, está fuertemente correlacionada con la arquitectura del resto [58].

Diferentes autores muestran una similitud moderada en la arquitectura del SM, ST y las dos cabezas del BF y exponen que la similitud en la arquitectura es menor entre ambos músculos mediales (ST-SM) y entre ambos laterales (CLBF y CCBF), de modo que cada par tiene un músculo diseñado para las acciones con amplia excursión (ST y CCBF, respectivamente) mientras que el otro par (SM y CLBF) lo está para la producción de picos altos de fuerza [58].

Esta reflexión de estructura conjunta también es tomada en cuenta a nivel macroanatómico, de forma que el BF y el SM divergen entre sí en la parte distal de su recorrido, pero, sin embargo, la parte muscular de cada músculo se enfrenta a la parte tendinosa del otro. Por otra parte, el ST se encuentra en un "lecho" músculo-tendinoso a lo largo de su recorrido. Proximalmente, el lecho está formado por la parte tendinosa del AM y el tendón proximal del SM pero este último pronto se expande y da origen a las fibras musculares, de modo que a lo largo de la mayor parte de su recorrido el ST se encuentra sobre la zona más superficial del SM. De este modo, durante la totalidad de sus recorridos el vientre muscular de un músculo está en contacto con la parte tendinosa del otro, formando ambos juntos una masa cilíndrica, en la que la acción de uno no interfiere con la del otro [31].

Algunos autores proponen que el SM consta de 3 unidades unipennadas y que cada una de ellas tiene un sitio de inserción distal específico, está inervada por un nervio individual y realiza una función concreta sobre la articulación de la rodilla [59]. En esta línea y respecto a la base de la orientación fascicular, se hace referencia a una triple división del vientre muscular, catalogándose 3 regiones (A, B y C). Los fascículos más superiores (región A) surgen de la delgada superficie medial del tendón proximal, que está posicionado en el plano medial. Estos fascículos pasan hacia distal para unirse a la superficie lateral del tendón distal. Un segundo grupo de fascículos (región B) surgen de las superficies medial y lateral del tendón proximal, prolongándose hacia distal y posterior, para insertarse en la cara lateral del tendón distal. Por último, un tercer grupo de fascículos (región C), más distal, es grueso y de disposición bipennada. Estos terceros fascículos surgen del borde lateral grueso del tendón proximal y discurren distalmente para insertarse en el tendón distal, amplio y expansivo [5]. La inervación de estos fascículos corresponde al nervio ciático (L5-S2) a través de su rama tibial [1–4], pero no existe un patrón uniforme, habiéndose descrito que los fascículos de dos de estas regiones (las nombradas

como región A y C) lo están por una misma rama nerviosa, mientras que los de la región B lo están por una rama diferente [5].

1.2.2 Biomecánica

El ST, el SM y la CLBF, son músculos biarticulares y atraviesan la articulación de la cadera y la rodilla, pudiendo trabajar todos ellos tanto de manera concéntrica como excéntrica sobre las dos articulaciones. Debido a su punto de inserción proximal en la tuberosidad isquiática, también ejercen una acción sobre la pelvis. Por su parte, la CCBF es monoarticular y tan solo atraviesa la articulación de la rodilla, por lo que su acción se limita a esta articulación [7,60,61].

A nivel biomecánico, en muchas ocasiones los músculos isquiosurales actúan de manera sinérgica y realizan una acción conjunta pero en momentos concretos del ciclo de la marcha, al correr o al girar, el SM, el ST y el BF cumplen funciones diferentes y cada uno de ellos ejerce un papel específico, con unos tiempos de acción concretos [32].

Implicación en la biomecánica de la pelvis

Cuando la acción muscular del SM, el ST y el BF, ya sea de manera analítica o global, tiene lugar en cadena cinética cerrada y de manera concéntrica, comporta una retroversión de la pelvis, así como una tendencia a la posteriorización ilíaca [61–63]. Esta oscilación de la pelvis hacia atrás permite restablecer la horizontalidad de la línea biespinosa y hace que el sacro se verticalice, por lo que, en última instancia, comporta una disminución de la lordosis lumbar [61]. Esta capacidad para provocar una retroversión pélvica se traduce a su vez en un control de la anteversión de la misma, que se pondrá de manifiesto especialmente al final de la flexión del raquis y en muchas ocasiones conllevará un trabajo en excéntrico [61].

El hecho de tener un patrón en retroversión pélvica perpetuado de manera continuada e involuntaria debido a una musculatura isquiosural hiperactiva puede llevar a una inclinación pélvica posterior permanente, que conduzca a una alteración de la biomecánica del raquis [64]. De igual manera, también se ha constatado que un acortamiento de la musculatura isquiosural podría comprender inestabilidad pélvica y de la marcha, llegando incluso a tener manifestaciones clínicas [65].

Por otra parte, dado que existen conexiones entre la inserción proximal de la CLBF y el ligamento sacrotuberoso y considerando que la tensión del ligamento sacrotuberoso comporta implicaciones en la cinemática de la articulación sacroilíaca, se ha planteado que la fuerza de

este músculo puede influir en la tensión del ligamento sacrotuberoso y que, al hacerlo, puede repercutir dinámicamente en la estabilidad de las articulaciones sacroilíacas, por lo que el trabajo de los isquiosurales influiría en la articulación sacroilíaca y, por extensión, en la cinemática de la espalda baja [65].

De todos modos, esta relación biomecánica entre los músculos isquiosurales y la pelvis no implica tan solo que la acción de los primeros conlleve una repercusión sobre la segunda, sino que también se produce un efecto inverso [65], y hay sugerencias de que una mayor inclinación pélvica anterior acabará comportando un aumento de la longitud de los músculos isquiosurales incrementándose así el riesgo potencial de lesiones [66,67].

Implicación en la biomecánica de la cadera

Los músculos isquiosurales tienen un papel importante como extensores de la cadera pero también actúan como aductores. Además, cuando el miembro inferior gira alrededor de su eje mecánico longitudinal, es decir, con la rodilla en extensión y la cadera y el pie a modo de eje, éstos ejercen un papel de rotadores externos [60].

Haciendo una valoración más analítica, la CLBF y el SM son más activos en la extensión de cadera que el ST y la CCBF que, por el contrario y como se verá en el siguiente apartado, cobran más protagonismo en la flexión de rodilla [68].

Implicación en la biomecánica de la rodilla

Como flexor de rodilla:

Trabajando en cadena cinética abierta y de manera concéntrica, la contracción en conjunto de los músculos isquiosurales comporta una acción de flexión de la rodilla. Si trabajan analíticamente, el ST y SM ejercen una acción de flexión y rotación medial, mientras que el BF actúa como flexor y rotador lateral [1,2]. En cualquier caso, para que tenga lugar el componente rotacional de la rodilla es necesario que la articulación esté en flexión puesto que en extensión completa este movimiento queda bloqueado, debido al encaje de los cóndilos femorales en las glenoides de la meseta tibial (que aumenta su superficie cóncava mediante la interposición de ambos meniscos) y porque en esta posición el ligamento cruzado anterior y el ligamento cruzado posterior se enrollan entre ellos y están en tensión, actuando así como tope y limitando el recorrido articular en las rotaciones [2,60,69]. En estudios sobre cadáver también se ha comprobado que la acción analítica del BF comporta una abducción de la tibia con respecto al

fémur mientras que el trabajo conjunto del ST y el SM conlleva una aducción sobre la misma [70].

La característica de la biarticularidad de los músculos isquiosurales sobre la cadera y la rodilla comporta, por una parte, que deba estabilizarse una de las dos articulaciones para que se produzca una acción biomecánicamente efectiva sobre la otra [26] y, en segundo lugar, que la posición de la cadera condiciona directamente la función que ejercen estos músculos sobre la rodilla, y viceversa [2,60]. Así, cabe considerar que cuando la flexión de la cadera aumenta y se mantiene inmóvil el punto de inserción distal, la distancia entre las inserciones proximales y las distales de los músculos SM, ST y CLBF también aumentan entre ellas, por lo que aumenta la tensión de estos 3 músculos. Esta situación de alargamiento y tensión muscular provocada por la flexión de la cadera comporta que su eficacia como músculos flexores de la rodilla, aumente. Del mismo modo, la extensión de la rodilla favorece la acción del SM, ST y BF como extensores de cadera [60]. Por contra, si la cadera se coloca en una posición de extensión completa y se combina con una flexión de rodilla, los músculos SM, ST y CBLF están en una posición de acortamiento, cosa que reduce su capacidad para realizar la flexión de la rodilla activamente e, incluso, provoca que no sea posible realizar este movimiento en su amplitud máxima de manera activa [2]. Este hecho da valor a la importancia de los músculos CCBF y poplíteo en su condición de flexores de rodilla puesto que al ser monoarticulares conservan su eficacia flexora, independientemente de cuál sea la posición de la cadera en el momento de realizar su acción biomecánica [60].

En cualquier caso, y teniendo en consideración las relaciones entre la estructura de un músculo y la función que éste realiza, en base a que los músculos cuya arquitectura está compuesta por fascículos más cortos y de mayor ángulo de pennación estarían diseñados para acciones que requieren una mayor producción de fuerza y rigidez, mientras que los que cuentan con fascículos más largos y ángulo de pennación más reducido lo estarían para acciones de una mayor excursión y mayor velocidad de acortamiento [71,72], diferentes autores concluyen que los músculos SM y CLBF formarían parte del primer grupo mientras que el ST y la CCBF estarían integrados en el segundo [58]. En esta línea, también cabe considerar que el ST y la CCBF son más activos en la flexión de rodilla que el SM y la CLBF, que cobran más protagonismo en la extensión de cadera [68].

Como estabilizador articular:

En lo que refiere a la rodilla, además de su función como músculo flexor, el SM tiene un papel importante como estabilizador de esta articulación, tanto por su acción muscular activa y su responsabilidad propioceptiva, como por su colaboración como estructura de refuerzo anatómico [11,14,73].

La “esquina posteromedial de la rodilla” (de la traducción literal del inglés del concepto “*posteromedial corner knee*”) se ha descrito como una unidad sinérgica músculo-ligamento-menisco, compuesta por cinco componentes principales: el tendón distal del SM y sus expansiones, el ligamento poplíteo oblicuo, el ligamento oblicuo posterior, la cápsula articular posteromedial de la rodilla y el cuerno posterior del menisco medial. Estos cinco elementos trabajan en conjunto para proporcionar estabilidad articular posteromedial a la rodilla [74] y le proporcionan soporte estático y dinámico, lo que restringe la rotación anteromedial de la tibia [38]. Aunque las porciones superficial y profunda del ligamento colateral tibial (y también el ligamento meniscotibial) funcionan en estrecha asociación con los componentes de la esquina posteromedial y también son estructuras de soporte medial, no suelen considerarse parte de este complejo estabilizador [75]. El soporte dinámico lo aportan las unidades miotendinosas y sus aponeurosis, de las cuales el SM es el principal elemento dinámico [76]. El soporte estático lo proporcionan los ligamentos circundantes y la cápsula articular [12,42,76] así como el cuerno posterior del menisco medial que, condicionado por una acción previa del SM, actúa como “freno” del movimiento [76]. Todos ellos trabajan en sinergia con la acción de los músculos y los tendones de la pata de ganso superficial cuando la rodilla está flexionada y del músculo vasto medial cuando la rodilla está extendida [76].

Cuando el complejo de la esquina posteromedial de la rodilla no actúa de manera competente tiene lugar la llamada inestabilidad rotacional anteromedial (conocida por su acrónimo en inglés AMRI, de *anteromedial rotational instability*) que se define como una excesiva traslación anterior y rotación lateral de la meseta tibial medial con respecto al fémur, acompañada de apertura del espacio articular medial [75]. Esta inestabilidad comporta un potencial riesgo de lesión sobre el ligamento cruzado anterior y sobre el menisco medial [77], así como una estimulación a la contracción del SM [44].

Por todo ello, la localización anatómica de las diferentes porciones del tendón distal del SM, distribuidas en diferentes puntos de inserción en forma de la pata de ganso profunda [7,42], así como su longitud de fibra más corta, un área de sección transversal más grande y un tendón más

corto [78], le confieren una serie de particularidades que se traducen en capacidades biomecánicas que le otorgan una gran importancia sobre la estabilidad de la rodilla, tanto en los movimientos de rotación como en el control de la traslación anterior de la tibia, la hiperextensión y el valgo [7,42,75,76,78].

El SM interviene en la estabilización de la rodilla en el plano sagital. Este plano es perpendicular al suelo, divide el cuerpo en derecha e izquierda y contiene los ejes sagital y longitudinal [1]. En este plano se desarrollan los movimientos de flexión y extensión de rodilla (en el eje transversal) así como los de traslación anterior y posterior de la tibia respecto al fémur [63].

Estando la persona en bipedestación estática y simétrica, y con las rodillas en extensión completa, los cóndilos femorales se acoplan en los cóndilos tibiales mediante la intersección de los meniscos, derivando en una posición de la tibia ligeramente rotada hacia lateral y del fémur hacia medial, comportando así un bloqueo pasivo en extensión y transformándose el miembro inferior en una columna rígida en equilibrio de fuerzas [60]. En esta posición es posible sostener el peso del cuerpo pasivamente prácticamente sin la necesidad de que actúen las estructuras dinámicas de estabilización [4,63]. En el momento en qué se modifica ligeramente esta posición de completo equilibrio, ya sea adoptando una ligera flexión de rodilla o yendo a la hiperextensión, la articulación precisa de la intervención de diferentes elementos para lograr su estabilización. Dichos elementos son los grupos musculares que intervienen en el movimiento de la flexo-extensión, los ligamentos cruzados y el complejo de la cápsula articular, con sus refuerzos [60].

De este modo, cuando de esta posición erecta con un completo equilibrio pasivo de las fuerzas del cuerpo sobre la articulación, se pasa a una posición con una ligera flexión de la rodilla, el vector de fuerza que ejerce el peso del cuerpo en su eje axial pasa por detrás del su eje de flexo-extensión de la rodilla, por lo que tiende a aumentar la flexión inicial. Para contrarrestar esta tendencia se activa el músculo cuádriceps femoral mediante una contracción estática, posibilitándose así la continuidad de la posición erecta y evitándose una claudicación de la articulación en flexión [60]. Por el contrario, cuando la rodilla se desplaza a una posición inicial de hiperextensión el vector de fuerza que ejerce el peso del cuerpo en su eje axial pasa por detrás del eje de flexo-extensión de la articulación y se descompone en dos vectores, uno vertical en el eje axial y otro en horizontal hacia atrás, por lo que la rodilla tiende a aumentar la hiperextensión y a provocar un *geno-recorvatum* [60]. Cuanto más se acentúa este *geno-*

recurvatum, más aumenta el vector de fuerza hacia posterior, tensando y estresando mecánicamente partes de los ligamentos cruzado anterior y posterior, del ligamento colateral tibial y peroneal, la cápsula posterior, el LPO, la fascia y la piel [4]. Cuando esta acción es repetitiva y mantenida en el tiempo se provoca una distensión de las estructuras. A su vez, esta distensión de las estructuras de refuerzo capsular comporta una pérdida en su competencia de estabilización posterior de la articulación como estructura pasiva, lo que implica una mayor tendencia a la hiperextensión y, en definitiva, favorece la instauración de un círculo vicioso que perpetúa y magnifica la inestabilidad [60].

Por tanto, la cápsula articular posterior ayuda a controlar pasivamente esta situación y a controlar la hiperextensión [1,4,63] y debido a que la articulación de la rodilla no tiene un elemento óseo que limite el movimiento extremo, como puede ser el olécranon en la hiperextensión del codo o el maléolo peroneal en el movimiento de eversión del tobillo, la acción de las estructuras capsuloligamentarias posteriores y de los elementos musculares accesorios que actúan como refuerzo de la misma adquieren mayor valor.

Estas estructuras de refuerzo de la cápsula posterior de la rodilla son los ligamentos poplíteos (el ligamento poplíteo oblicuo, formado por las fibras del tendón recurrente del SM y el ligamento poplíteo arqueado, que pasa por encima del músculo poplíteo y que se inserta en la cabeza del peroné) [1,60,69], por lo que se enfatiza el papel de ambos como estructuras pasivas de contención articular anteroposterior y, en especial, la importancia del SM como elemento estructural, mediante la aportación de uno de sus tendones de inserción distal (el LPO) como parte de la cápsula posterior de la rodilla [1,60,69]. Por este motivo, el LPO está considerado como la restricción principal para la hiperextensión de la rodilla y tiene una gran importancia en la prevención del *geno-recurvatum* [79–82].

De todos modos, en el plano sagital la estabilidad anteroposterior de la rodilla en lo que respecta al control de la hiperextensión no está garantizada únicamente con la existencia de una cápsula articular potente, por muy sólida que ésta sea, y por la presencia de otros elementos como el ligamento cruzado anterior y el ligamento cruzado posterior, sino que precisa de la intervención activa de las acciones de la musculatura extensora y flexora de rodilla [60,69] y de la tracción que ejerce el músculo gastrocnemio al ser tensado durante el movimiento de flexión dorsal de la articulación tibiotarsiana [60].

Por otra parte, cuando la rodilla está flexionada la tendencia natural del LPO es relajarse y se tensa cuando la rodilla está en extensión. Así, cuando la rodilla está completamente extendida, la

tibia rota externamente, tensando las estructuras de su esquina posteromedial y formando una bolsa alrededor del cóndilo femoral medial. Con el inicio de la flexión y a medida que la tibia rota medialmente, las estructuras de esta esquina posteromedial se relajan, pero la contracción del SM tensa la cápsula posteromedial y sus ligamentos. A medida que aumenta la flexión, la cápsula posteromedial se relaja y se pliega sobre sí misma [75]. De este modo, se ha constatado que en la flexión de la rodilla la contracción del SM, a través de sus inserciones en el ligamento poplíteo oblicuo y la cápsula posterior, actúa para tensar las estructuras posteromediales, cuando de otra manera estarían laxas. Esto comporta también una retracción hacia posterior del menisco medial que permite que, a su vez, su cuerno anterior sirva como un elemento físico de restricción contra la traslación tibial anterior [76].

Por estos motivos, el SM, mediante su participación a través del ligamento oblicuo posterior, tiene un papel importante en el control de la traslación de la tibia, tanto a nivel anterior como posterior [75].

En dinámico, el papel estabilizador del SM sobre la rodilla se pone de manifiesto durante la marcha y la carrera, puesto que tanto el SM como el resto de los músculos isquiosurales están implicados en la biomecánica de las diferentes fases del ciclo [78,83]. Al caminar, correr o girar, el SM, el ST y la CLBF realizan algunas acciones de manera conjunta y, a la vez, cada uno de ellos también ejerce un papel específico, con unos tiempos de acción concretos [32].

En la fase inicial de oscilación o balanceo, los músculos isquiosurales se activan para controlar la desaceleración de la pierna mientras ésta se mueve hacia adelante, utilizando contracciones excéntricas para prevenir una hiperextensión de la rodilla y controlar una adecuada flexión de cadera. En la fase final de balanceo, los músculos isquiosurales se activan nuevamente para preparar la extremidad para el contacto del talón con el suelo, contribuyendo a la extensión de la cadera y controlando la extensión de la rodilla [26,65,83].

En la fase inicial del apoyo, trabajando ya en cadena cinética cerrada, los isquiosurales ayudan a estabilizar la pelvis y el tronco, e incrementan la tensión del ligamento sacrotuberoso [65]. A medida que el pie toca el suelo los músculos isquiosurales trabajan para absorber el impacto y controlar el movimiento hacia adelante del centro de masas del cuerpo. En este punto es crucial su acción de frenada de la traslación anterior de la tibia, ayudado por la acción estabilizadora pasiva del ligamento cruzado anterior. Esto ocurre principalmente cuando la rodilla está flexionada a 30º y el pie alcanza su mayor recorrido hacia adelante [26].

Por último, en la fase de despegue y en colaboración con otros músculos como el glúteo mayor, extienden la cadera y ayudan a propulsar el cuerpo hacia adelante, a la vez que, con la ayuda del músculo cuádriceps femoral, se contraen nuevamente para proporcionar un impulso desde la pierna de apoyo [26].

Estas acciones mecánicas de los músculos isquiosurales durante la marcha se reproducen cuando la persona corre y se magnifican aún más en una acción de carrera a alta velocidad. Algunos autores describen que durante la fase de apoyo la fuerza producida por los músculos de la cadera y la rodilla se dirige a contrarrestar la fuerza de reacción del suelo, mientras que en la fase de oscilación el trabajo muscular pretende contrarrestar el efecto de las fueras causadas por el movimiento oscilatorio del miembro inferior implicado [84]. De igual manera, otros estudios detallan que durante la fase de oscilación final y al contacto del talón con el suelo, las fuerzas pasivas generadas por el movimiento de la cadera y la rodilla actúan elongando los músculos isquiosurales, debiendo producirse fuerzas activas por parte de éstos para contrarrestarlas [85].

Por otra parte, en una carrera a alta velocidad los músculos isquiosurales no trabajan de forma idéntica entre ellos y el trabajo que ejerce cada uno difiere del del resto, siendo estas diferencias más significativas entre los dos músculos localizados a nivel medial (ST y SM) en comparación con el BF, localizado a nivel lateral [86–89]. Además la activación de cada uno de los músculos no es uniforme y regular durante todo el ciclo de la marcha y de la carrera sino que se modifica durante los diferentes momentos del paso [90]. De este modo, la función adecuada de los músculos isquiosurales es crucial para una marcha y carrera normales y las disfunciones en estos músculos, ya sea por debilidad o rigidez, pueden alterar la mecánica del movimiento de la marcha y la carrera, y derivar en una repartición anormal de las cargas en la columna lumbar, la cadera y/o la rodilla [86–89].

La importancia de las acciones de los músculos isquiosurales sobre el control del movimiento de flexo-extensión de la rodilla hace que sean considerados como unos verdaderos factores activos de limitación articular [60]. Este hecho, añadido a la especificidad en las acciones de cada uno de ellos por separado, implica que el SM tiene un papel de alto valor en la estabilidad de la rodilla a nivel anteroposterior, tanto en estático como durante la dinámica de la marcha y la carrera [32].

El SM también interviene en la estabilización de la rodilla en el plano transversal, que divide el cuerpo en una parte superior y una inferior y contiene los ejes transversal y sagital [1]. En este plano, y en el eje longitudinal, se desarrollan los movimientos de rotación medial y lateral de la rodilla [63], en los cuales el SM ejerce un importante papel de estabilizador rotatorio [11].

Durante la acción de flexo-extensión de la rodilla, estando ésta en cadena cinética cerrada (como en el gesto de levantarse y sentarse de una silla manteniendo ambos pies en el suelo, por ejemplo) los cóndilos femorales realizan un desplazamiento combinado, involuntario e inevitable que comporta un triple movimiento de rodamiento, deslizamiento y rotación de los mismos respecto a la superficie del platillo tibial [60].

Durante la flexión en cadena cinética cerrada, es decir, en el momento de realizar la acción de sentarse, los cóndilos femorales tienden a desplazarse hacia atrás pero dado que el cóndilo femoral lateral es menos convexo que el medial en dirección anteroposterior y que la glenoide del cóndilo lateral de la tibia es más plana o, incluso, ligeramente convexa en esa misma dirección, el cóndilo lateral del fémur tiene un mayor recorrido que el que tiene el cóndilo medial, por lo que el eje mecánico bicondíleo rota lateralmente (en el sentido de las agujas del reloj en la rodilla derecha y en el sentido contrario a las agujas del reloj en la rodilla izquierda). Por el contrario, al realizar una extensión en cadena cinética cerrada (en el gesto de levantarse de una silla, por ejemplo), sucede lo contrario: los cóndilos femorales ruedan hacia delante y, dado que rueda más el cóndilo lateral que el medial, el eje bicondíleo se desplaza hacia delante y rota medialmente (en el sentido contrario al de las agujas del reloj en la rodilla derecha y en el de las agujas del reloj en la rodilla izquierda). Éste hecho comporta que en extensión completa la tibia quede ligeramente rotada hacia lateral y exista un perfecto acoplamiento de las superficies articulares de los cóndilos femorales medial y lateral en las respectivos meniscos, dispuestos sobre las glenoides de los cóndilos del platillo tibial que, unido a la tensión de los ligamentos, comporta que los movimientos de rotación no sean posibles [60].

En cambio, este movimiento de rotación sí que es posible en una posición de flexión [1,2,60], permitiéndose una amplitud articular pasiva de la tibia respecto al fémur en una rodilla sana, y estando en una flexión de 90º, de unos 30º de rotación lateral y 10º grados de rotación medial [2].

El control rotacional de la rodilla queda asegurado por los elementos estabilizadores activos y pasivos. Las estructuras que limitan la rotación lateral de la tibia son el cuerno posterior del

menisco medial, el casquete condíleo medial, la càpsula anteromedial y posteromedial y el ligamento colateral tibial, así como el enrollamiento de los ligamentos cruzados; mientras que la rotación medial de la tibia queda limitada por el tercio posterior de la càpsula articular y las estructuras de soporte laterales, el LCP y el ligamento colateral peroneal [69].

En consecuencia, en la rotación medial de la tibia los ligamentos cruzados se enrollan y se tensan (por lo que limitan este movimiento) y los ligamentos colaterales se distienden (porque se verticalizan) mientras que en la rotación lateral los ligamentos cruzados se desenrollan y se destensan [2,60] y los ligamentos colaterales aumentan su oblicuidad y, por tanto, se tensan y actúan como limitadores del movimiento [60]. Al papel que juegan estas estructuras anatómicas como estabilizadores pasivos deben añadirse los elementos estabilizadores activos, que son la acción del músculo tensor de la fascia lata y del BF en la limitación de la rotación medial (como rotadores laterales que son) y la acción de los músculos de la pata de ganso superficial, del SM y del músculo poplíteo en la limitación de la rotación lateral (gracias a su acción como rotadores mediales de la tibia) [60,69].

En ambos casos, tanto en la estabilización de la rotación medial como de la lateral, los elementos descritos no trabajan de manera exclusivamente analítica y no debe considerarse la acción de cada uno de ellos sin tener en cuenta la presencia del resto del conjunto estabilizador [4]. En este sentido, y a pesar de la implicación de otros músculos (trabaja sinérgicamente con el poplíteo, participando así en la estabilidad de la esquina posterolateral, y con el BF para la estabilidad dinámica de la rodilla para la rotación medial y lateral [38,76,91]), el SM revaloriza su acción como rotador medial de la rodilla, no tanto porque su acción le permita ganar un amplio recorrido en el balance articular en lo que respecta a los grados de rotación medial, sino por la colaboración que aporta como componente de freno de la rotación lateral que, de estar descontrolada, comportaría un riesgo lesivo potencialmente alto, tanto a nivel meniscal como de los diferentes ligamentos implicados [38,76,91]. Por estos motivos, el SM se considera el principal estabilizador posteromedial de la rodilla [50].

El SM además de tener un papel estabilizador de la rodilla en el plano sagital (tanto con en el control de los movimientos de traslación anterior de la tibia como limitando la hiperextensión) y en el plano transversal (en los movimientos de rotación lateral y medial de la rodilla cuando ésta está en flexión), también tiene una acción estabilizadora en el plano frontal, estando la rodilla en en extensión [75,76]. Este plano divide el cuerpo en una parte anterior y una posterior (o ventral

y dorsal), y contiene los ejes transversal y longitudinal [1]. En este plano, y en el eje sagital, se desarrollan los movimientos de valgo y varo de la rodilla [63] y el SM juega un importante papel de estabilizador del valgo.

Esta estabilización viene dada por dos aspectos: el primero, por su aportación como estructura anatómica que actúa como elemento de refuerzo de los elementos limitadores pasivos y el segundo por su papel como elemento estabilizador activo, ejerciendo una acción muscular activa, con la correspondiente integración como elemento de la estructura de la esquina posteromedial rodilla [74–76].

Respecto al primer punto, el SM suma su acción estabilizadora del valgo de rodilla en especial a la del ligamento colateral tibial. Este ligamento está compuesto por tres capas, donde la capa I consistiría en la fascia profunda o crural, la capa II incluiría el ligamento colateral tibial superficial y la capa III estaría formada por la cápsula articular y el ligamento colateral tibial profundo [92]. De estas porciones, el ligamento colateral tibial superficial es el principal elemento de contención del estrés en valgo en todos los ángulos de flexión mientras que el ligamento colateral tibial profundo es un estabilizador estático secundario. Estando la rodilla en extensión, el ligamento colateral tibial en su totalidad es un estabilizador adicional que proporciona un tercio de la contención del estrés en valgo. De producirse una lesión aislada del ligamento colateral tibial, el ligamento oblicuo posterior actúa como un importante estabilizador secundario para la rotación y el estrés en valgo [75,80,91,93].

Algunos autores dividen en tercios el aspecto medial de la rodilla, desde el borde medial del ligamento rotuliano hasta el borde medial de la cabeza medial del músculo gastrocnemio, con las fibras longitudinales del ligamento colateral tibial superficial en el tercio medio y las estructuras anteriores y posteriores a él en los tercios anterior y posterior, respectivamente. El ligamento colateral tibial superficial es parte de la capa II descrita y forma el tercio medio del lado medial de la rodilla [14]. Es la estructura más grande del aspecto medial de la rodilla y consta de una inserción femoral y dos inserciones tibiales [42]. La inserción femoral es ovalada y, en promedio, está a 3,2 mm proximal y 4,8 mm posterior al epicóndilo medial. A medida que el ligamento colateral tibial superficial discurre distalmente, tiene dos inserciones tibiales: la inserción tibial proximal se encuentra principalmente en el tejido blando sobre la terminación del brazo anterior del tendón del SM y se encuentra a una distancia promedio de 12,2 mm distal a la línea de la articulación tibial; la inserción tibial distal del ligamento colateral medial superficial es ancha y se

encuentra directamente en el hueso a una distancia promedio de 61,2 mm distal a la línea de la articulación tibial, justo anterior a la cresta posteromedial de la tibia [42]. Estas dos inserciones tibiales distintas del ligamento colateral tibial superficial dan lugar a dos divisiones funcionales distintas [79]. A pesar de su proximidad topográfica, el tendón del SM no participaba en ninguna de las capas del ligamento colateral tibial [92].

Las estructuras que se encuentran entre el margen posterior de las fibras longitudinales del ligamento colateral tibial superficial y el borde medial del ligamento cruzado posterior son las que forman parte de la llamada “esquina posteromedial”, los elementos de la cual han sido descritos previamente y de los cuales el SM es el estabilizador dinámico más importante [75].

Respecto al punto segundo, en estudios realizados sobre cadáver se ha visto que el SM y el ST tienen la capacidad de actuar como aductores de la tibia con respecto al fémur cuando ambos trabajan de manera conjunta y en cadena cinética abierta, aspecto que evita que la rodilla se vaya en valgo, ya sea durante un trabajo en cadena cinética abierta, como cerrada [70]. Por otra parte, algunos autores afirman que los ligamentos producen un efecto estabilizador cinético a través de la contracción del SM [94].

En ambos casos, tanto la presencia anatómica de las inserciones distales del SM como su implicación biomecánica otorgan nuevamente al SM un importante papel como estabilizador de la articulación de la rodilla, en este caso actuando como elemento limitador del valgo [11].

1.2.3 Lesiones

Lesiones propias

En los músculos isquiosurales tienen lugar las lesiones deportivas más comunes y pueden estar asociadas a un largo periodo de rehabilitación y recidivas [9,18,95]. Dichas lesiones suelen producirse en ausencia de traumatismos directos y se desencadenan al realizar actividades como correr o saltar [18,95], especialmente al realizar una rápida flexión de la cadera con extensión simultánea de la rodilla [96]. La implicación de los músculos isquiosurales en estos gestos biomecánicos los hace especialmente vulnerables ante estas acciones potencialmente lesivas [18,97] y es frecuente observarlas en atletas que practican fútbol, baloncesto, rugby, atletismo o esquí, entre otros [9,18,95,98], teniendo una incidencia de 1,2 a 4 lesiones por cada 1000 horas de exposición atlética [83,96]. De todos modos, también se producen en personas que no practican deporte [98] y su prevalencia está aumentando en los adultos mayores durante las

actividades diarias debido a la población mayor cada vez más activa [7] y a los procesos degenerativos que presentan en la unidad músculo-tendón-hueso [99].

De los músculos isquiosurales, la CLBF es el músculo que se lesiona con más frecuencia [6,10,24,95,100,101] y, a pesar de que no hay consenso sobre ello [24] y que algunos estudios describen que el segundo lugar lo ocuparía el ST [100,101], se considera que el SM es el segundo músculo más afectado [23,24,26,95]. En concreto, el CLBF es el que más se lesiona durante la carrera a alta velocidad, mientras que el mayor número de lesiones en el SM se produce ante situaciones de estiramientos extensos, especialmente en posiciones combinadas de flexión de cadera y extensión de rodilla [24]. En esa acción potencialmente lesiva, las lesiones generalmente se localizan a una distancia media de 2,3cm distal a la tuberosidad isquiática [102]. A día de hoy se desconocen la totalidad de los motivos de la mayor incidencia de lesiones en un músculo isquiosural que en otro, en concreto un mayor número de ellas en la CLBF en comparación con el ST y SM, y esta falta de conocimiento contribuye a las dificultades para identificar a los individuos con mayor riesgo de sufrir lesiones, así como a la formulación de estrategias para prevenir y tratarlas [6]. En esta línea, no se ha podido establecer ninguna hipótesis válida basada únicamente en la longitud de cada uno de los músculos isquiosurales, en la longitud de la unión miotendinosa y/o en la longitud de los tendones (tanto el tendón libre como el tendón total) [24], pero sí que se ha planteado la hipótesis de que algunas características anatómicas, morfológicas (entre ellas la estructura de la unión musculotendinosa) o fisiológicas específicas podrían ser un factor de predisposición (o de protección) ante las lesiones de los músculos isquiosurales, incluidas las del SM [6,10,23,24].

Con respecto a la localización de la lesión por distensión, se sabe que la unión miotendinosa, como interfaz entre el músculo y el tendón, es el eslabón más débil de la cadena musculotendinosa en los músculos en general [103]. En el caso concreto de los músculos isquiosurales, cualquier parte puede verse afectada por una lesión [100] pero la unión musculotendinosa proximal es la más vulnerable y es la zona en la que tiene más riesgo de que se produzcan distensiones [24]. A pesar de ello y además de las distensiones, en el extremo proximal también pueden desarrollarse tendinopatías, avulsiones, apofisitis o entesopatías [7,8,22,25,104] y, en relación con las inserciones distales, también se han descrito avulsiones [39,55], tendinopatías [56], bursitis [45,48], desgarros capsulares [39,55] y lesiones meniscales [7,37,39].

En ambos casos, tanto en la inserción proximal como en la distal del SM, y debido a la complejidad anatómica de las estructuras, la variedad de lesiones es muy amplia [7,8,25,37,39,55,56,104] y el tipo de lesión, la gravedad de las mismas y la predisposición a que se produzcan, pueden verse influidas por las características de las inserciones tendinosas implicadas y por las diferentes variaciones anatómicas [7,9,10,18,24,105].

A pesar de no conocerse la totalidad de los factores de riesgo y/o de protección, se ha expuesto que la manera en la que se relacionan las diferentes estructuras entre ellas puede ser un factor determinante en el momento de tener una mayor o menor predisposición a producirse determinadas lesiones. En esta línea, se expone que la forma en que el tendón proximal del SM se relaciona con el tendón conjunto del ST y la CBLF, entrelazándose entre ellos, incrementa el brazo de palanca durante la contracción muscular y modifica su capacidad para soportar tensiones, a diferencia de lo que ocurriría si dichas estructuras se dispusieran de manera aislada [24]. Por otra parte, otros estudios consideran que la doble orientación que adopta el tendón en la inserción proximal le permite tener una mayor tolerancia a la tracción ejercida por las fuerzas musculares, lo que puede ser una de las causas por las que el SM tiene una menor tasa de lesiones en comparación con el BF a este nivel [10]. Por el contrario, y considerando que el tendón proximal del SM avanza distalmente con una torsión antes de terminar como una lámina tendinosa ancha [5,24] se ha propuesto que el SM podría ser más vulnerable que el resto de los músculos isquiosurales ante las lesiones en esta zona, debido a que dicha torsión causa una desalineación entre el vector resultante de la fuerza muscular y la línea de acción del tendón [24].

Respecto al tejido muscular propiamente dicho, si bien los músculos isquiosurales pueden tener una función común como grupo, existen diferencias intra e intermusculares significativas en su diseño que pueden influir en su capacidad de generación de fuerza, así como en las respuestas a las demandas de carga externa [23].

Respecto a los aspectos biomecánicos en relación al rol que juega la posición que adopta la pelvis como punto de anclaje de la inserción proximal, se ha hipotetizado que una mayor inclinación pélvica anterior acaba comportando un aumento de la longitud de los músculos isquiosurales y que esto puede predisponer a la lesión de los mismos [66,67,106] y, más específicamente, se ha identificado una mayor inclinación pélvica anterior como un factor predisponente para las distensiones de los músculos isquiosurales en los corredores [106].

Algunos autores sugieren también que es en la fase final de balanceo de la marcha/carrera (fase en la que los músculos isquiosurales inician un nuevo ciclo de activación para preparar la extremidad para el contacto del talón con el suelo y momento en el que contribuyen a la extensión de la cadera, controlando la extensión de la rodilla [26,65,83]) cuando hay más posibilidades de que sucedan las distensiones musculares en los músculos isquiosurales puesto que es entonces cuando están activándose para frenar y controlar la extensión de la rodilla y es cuando se produce un cambio repentino en su función, pasando de tener un papel estabilizador en la flexión a una actividad rápida en la extensión [107]. Este argumento también ha sido defendido por otros autores que lo refuerzan añadiendo que también se asocia al rápido alargamiento del músculo provocado por la acción de una flexión simultánea de la cadera [83].

En relación con el ligamento cruzado anterior

Los ligamentos cruzados son dos cordones fibrosos en forma de X que se localizan en el interior de la articulación de la rodilla, por fuera de la sinovial: el ligamento cruzado anterior (LCA) y el ligamento cruzado posterior (LCP). Su nomenclatura viene determinada por la disposición anatómica de sus inserciones tibiales [1].

Partiendo del área intercondílea anterior de la tibia, entre los dos meniscos, se localiza el LCA, que desde su inserción en la porción anteromedial de la eminencia tibial se dirige oblicuamente hacia posterior y lateral, insertándose en la parte pósteromedial del cóndilo femoral lateral. Por su parte, el LCP se localiza en el área intercondílea posterior de la tibia y sus fibras se extienden oblicuamente anterior y medialmente, hasta insertarse en la cara medial del cóndilo femoral medial [1,70].

La función principal del LCA es evitar que la tibia se desplace hacia delante respecto al fémur, mientras que la del LCP es evitar que lo haga hacia atrás [1].

Cuando la rodilla está en una posición de extensión completa ambos ligamentos se enrollan entre ellos debido a la cinemática de rodamiento de los cóndilos femorales respecto a las respectivas glenoides del platillo tibial, cosa que provoca su tensión y refuerza la limitación pasiva de dicho movimiento de extensión. Por otra parte, durante su recorrido en el movimiento de flexo-extensión los ligamentos cruzados ayudan a dirigir el deslizamiento de los cóndilos femorales [1,60].

Por este motivo, entre otros, los ligamentos cruzados desempeñan un papel importante en el mantenimiento de la estabilidad de la rodilla y en su cinemática [108].

El LCA es el ligamento de la rodilla que se lesiona con más frecuencia [70,108]. Una lesión de este ligamento puede provocar inestabilidad de la rodilla e incluso después de una cirugía estándar de reconstrucción, puede llevar a un deterioro de la biomecánica de la rodilla, de la función muscular, de la coordinación y una secuela en forma de osteoartritis [109]. A excepción de las posibles características morfológicas individuales, la hipótesis más plausible es que la primera causa de riesgo para producirse una lesión del LCA pasa por un déficit en el control neuromuscular durante los movimientos dinámicos [108].

Muchos estudios que contemplan las fuerzas ejercidas por los músculos flexo-extensores de la rodilla han establecido un consenso general con respecto al efecto que el músculo cuádriceps femoral y los músculos isquiosurales, en su conjunto, tienen sobre los valores de tensión del LCA. Cuando la rodilla está cerca de la extensión, la fuerza producida por la contracción del músculo cuádriceps femoral traslada la tibia en dirección anterior con respecto al fémur, lo que produce valores de tensión del LCA aumentados, por lo que el riesgo potencial de lesión del ligamento aumenta [110–112]. De este modo, la acción de los músculos isquiosurales en su conjunto, en contraposición a la ejercida por el músculo cuádriceps femoral, restringe la traslación anterior de la tibia y puede disminuir los valores de tensión del LCA en todo el rango de movimiento de flexión-extensión de la rodilla [110–112].

Por otra parte, varios estudios biomecánicos han relacionado la rotación medial de la tibia con una mayor carga sobre el LCA [113–116] y también se ha constatado que la carga en valgo de la rodilla aumenta las tensiones sobre el mismo [116,117], por lo que tiene una gran importancia comprender la manera en qué los músculos contribuyen o se oponen a esas situaciones y, en definitiva, aumentan o disminuyen las cargas sobre el LCA, protegiéndolo así de una lesión potencial [118].

De este modo, se ha comprobado que el trabajo de cocontracción de los músculos isquiosurales en su conjunto reduce las tensiones y las fuerzas sobre el LCA, las fuerzas de corte anteriores, la traslación anterior de la tibia y la rotación medial de la tibia, lo que supone una protección para el LCA durante algunas maniobras potencialmente perjudiciales [118–120].

Sin embargo, su eficacia depende del ángulo de flexión de la rodilla. Cerca de la extensión completa los músculos isquiosurales son relativamente ineficaces a la hora de producir una fuerza de corte posterior debido a su línea de acción. Cuando son más eficaces para producir fuerzas de corte posteriores y descargar el LCA es en ángulos de flexión de rodilla mayores de 20-30° [118].

En estudios en cadáver se ha comprobado que, debido a sus diferentes sitios de inserción y brazos de momento en relación con la articulación de la rodilla, la acción que ejercen el SM, el ST y el BF actuando por separado sobre ella influye de diferente manera en las tensiones sobre el LCA. En estas investigaciones se realizaron mediciones en extensión completa, a 30°, 60 y 90°, y en todos ellos la carga del BF redujo la tensión sobre el LCA, mientras que el trabajo conjunto del ST y el SM tuvo poco efecto. Se observó que la tendencia a la reducción inducida de la tensión sobre el LCA aumentaba al incrementar los grados de flexión de la rodilla. Este estudio también concluyó que el LCA tenía una menor tensión cuando la rodilla estaba en rotación lateral mediante una contracción aislada del BF [70]. Trabajando individualmente, el SM tiene entonces menores posibilidades para descargar el LCA que el BF dada la diferencia en el potencial para generar fuerza muscular que comporten fuerzas de corte posteriores. Sin embargo, tiene más capacidad que el ST puesto que éste está muy limitado por su área transversal fisiológica, relativamente pequeña [118]. A pesar de esta conclusión que minimiza la acción del SM sobre el LCA si éste actuara de manera analítica, no se puede despreciar la contribución que tiene cuando trabaja de manera conjunta con el ST y el BF, puesto que la acción ejercida al unísono por todo el grupo muscular contrarresta la acción que pueda ejercer el cuádriceps en lo que respecta a la traslación anterior de la tibia [118–120].

Por otra parte, en una situación de extensión forzada de la rodilla el SM está en una posición excéntrica. Esta fuerza de reacción comporta un contraapoyo del tendón distal sobre el cóndilo medial del fémur que, viéndose reforzada su acción gracias a los refuerzos del tendón reflejo y del tendón recurrente, le permite imprimir un empuje de antepulsión sobre dicho cóndilo medial, actuando en contra de la acción de anteriorización de la tibia ejercida por el músculo cuádriceps femoral. Este “empuje” sobre el cóndilo medial del fémur también tiene su equivalencia en el cóndilo lateral por parte del BF pero en el caso del SM el resultado es mayor puesto que el BF tiene un contacto más lateral sobre el cóndilo lateral que el que tiene el SM sobre el cóndilo medial [54]. La presencia de numerosas bursas sinoviales en la zona posterior de la rodilla (la bursa de la cabeza medial del músculo gastrocnemio, la bursa de la cabeza lateral del músculo gastrocnemio, la bursa poplíteica, la bursa semimembranosa y la bursa del músculo bíceps femoral) señalan esta clase de acción para varios músculos [54]. Esta acción es otro de los elementos que hacen que el SM se considere un factor activo de protección del LCA [54].

A nivel propioceptivo también se establece una estrecha relación entre el LCA y el SM. En una situación de traslación anterior de la tibia, la cápsula articular de la rodilla y los ligamentos (en particular el LCA) provocan una respuesta excitatoria en los músculos isquiosurales y en los gastrocnemios que desencadenan su contracción de manera refleja y permite una protección del ligamento por anticipación [121].

Esta activación propioceptiva que incita a la contracción precoz del SM también se ve reflejada en los desplazamientos meniscales en los movimientos de flexión de rodilla y facilita la acción de “freno” del movimiento del menisco medial en lo que respecta a la traslación anteriomedial de la tibia, por lo que el SM también está integrado en la acción protectora del menisco medial hacia el LCA [77]. En este sentido, se ha establecido una relación directa entre la prevalencia de las lesiones del LCA y las lesiones “en rampa” del menisco medial [122] y hay estudios biomecánicos que describen que la presencia de una lesión meniscal “en rampa” aumenta significativamente la tensión sobre el LCA que ha sido sometido a cirugía de reconstrucción [123], lo que indica la importancia que tiene el menisco medial como elemento estabilizador y, por consiguiente, muestra la necesidad de que exista una correcta función propioceptiva previa del SM sobre el menisco para proteger al LCA [13,76].

En relación con los meniscos

Las lesiones meniscales, por su alta prevalencia y su complejidad en el manejo terapéutico, ya sea de manera conservadora o quirúrgica, merecen una atención especial en el momento de hablar de lesiones que puedan estar condicionadas por las relaciones que se establecen entre las inserciones del SM y las estructuras adyacentes.

Los meniscos son unas de las estructuras anatómicas con proximidad a las inserciones tendinosas distales del SM, especialmente por la conexión que se establece entre el menisco medial y el tendón recurrente del SM, debido a la localización de éste último en la parte posterior de la rodilla y a su integración en la parte posterior de la cápsula articular, donde forma el ligamento poplíteo oblicuo de la rodilla [11,12,35–38,41,42,44], por lo que, en algunos casos, algunas lesiones meniscales pueden ser debidas a la relación directa o indirecta que se establece entre ambas estructuras anatómicas [7,37,39].

En la acción de la flexión de la rodilla, la contracción del SM, a través de sus inserciones en el LPO y la cápsula posterior, actúa para tensar las estructuras posteromediales (cuando, de no hacerlo,

permanecerían en un estado de laxitud) y lleva asociado una tracción sobre el cuerno posterior del menisco medial y un movimiento hacia posterior de dicho menisco [13,76,124]. Esto favorece que el cuerno posterior del menisco medial actúe como una restricción contra la traslación tibial anterior y sirva así de protección de lesiones del LCA [76] y también que se anticipe en el movimiento meniscal, lo que evita que el menisco sea pellizcado entre el fémur y la tibia en el movimiento de flexión de la rodilla [13]. El hecho de que el SM esté orientado en paralelo al fémur comporta que este efecto protector sobre el menisco medial sea máximo a 90° de flexión y disminuye a medida que la rodilla se aleja de estos grados [76].

Para demostrar la relación propioceptiva entre el menisco medial y el SM y la importancia que esta relación conlleva, se ha descrito en estudios realizados durante intervenciones artroscópicas, que la estimulación eléctrica del asta posterior del menisco medial, sin presencia de lesión meniscal, produce una respuesta cortical que puede ser medida con potenciales evocados somatosensoriales (PES) y que comporta un potencial de acción muscular compuesto (PAMC) en el SM, verificándose también con electromiografía. Esta respuesta no se obtiene al estimular otras partes de la rodilla (cuerpo del menisco medial, cóndilo femoral medial, cápsula y espacio intraarticular), ni se observa en el músculo cuádriceps femoral y el músculo bíceps femoral, lo demuestra que existe una estrecha relación directa entre ambas estructuras anatómicas a nivel propioceptivo [53].

Existen diferentes tipos de lesiones meniscales y su abordaje terapéutico vendrá determinado por su localización y forma [125–128]. Entre ellas destacan, por su alta prevalencia, las lesiones meniscocapsulares del cuerno posterior del menisco medial. Estas lesiones pueden implicar a la inserción meniscocapsular periférica del cuerno posterior del menisco medial así como al ligamento meniscotibial y suelen presentarse como desgarros longitudinales periféricos de 2,5 cm en la unión meniscocapsular en rodillas con deficiencia del LCA. Cuando se encuentran por separado y debido a la inestabilidad anteromedial que se produce, una lesión del LCA comporta un mayor riesgo de sufrir una lesión meniscocapsular en el cuerno posterior del menisco medial y, a su vez, una ruptura meniscocapsular en el cuerno posterior del menisco medial comporta un mayor riesgo de sufrir una lesión del LCA [123].

Las lesiones que comportan un desgarro de la inserción periférica del cuerno posterior del menisco medial en la unión meniscocapsular o una lesión en la inserción meniscotibial se definen como lesiones meniscales “en rampa” [129]. El concepto de "lesión en rampa" describe un desgarro longitudinal periférico que se produce alrededor del área de la unión meniscocapsular,

y que tiene una inclinación similar a una rampa, con la parte anterior del desgarro ubicada más superiormente que la parte posterior [77]. Esta ubicación se puede explicar por el hecho de que entre el menisco medial y la cápsula se encuentra tejido adiposo frágil, y cuando la contracción del tendón semimembranoso pone la cápsula articular posteromedial en tensión con el menisco atrapado entre el fémur y la tibia, se produce un desgarro del ligamento menisco tibial y/o del ligamento menisco-capsular [44]. Si embargo, en ocasiones se hace referencia genéricamente a las lesiones en rampa como lesiones del ligamento meniscotibial posteromedial [130] y no hay una descripción bien definida en la literatura publicada [131]. A pesar de ello, las lesiones en rampa se clasifican en cinco subtipos, según las características del desgarro, la ubicación y la estabilidad: tipo 1, lesión meniscocapsular; tipo 2, lesión parcial superior; tipo 3, lesión parcial inferior o tipo oculto; tipo 4, desgarro completo en la zona roja; y tipo 5, doble desgarro completo [132].

Los meniscos incrementan el área de contacto entre el fémur y la tibia y amortiguan las fuerzas de compresión axial, rotación y cizallamiento [40,128] y una pérdida de tejido meniscal aumenta el contacto tibiofemoral y facilita la instauración de artrosis y la pérdida funcional de la rodilla [133]. Para minimizar este hecho, a nivel quirúrgico existe actualmente una tendencia hacia la reparación meniscal en lugar de la meniscectomía en el tratamiento de los desgarros meniscales [125]. En el acto quirúrgico, alguna de estas suturas meniscales implican directamente la cápsula articular y las inserciones musculares colindantes, entre ellas las relacionadas con las inserciones distales del SM [128,134,135].

Por estos motivos (la proximidad entre las estructuras anatómicas de la inserción del SM con la cápsula posterior y el propio cuerno posterior del menisco medial, el papel estabilizador anteromedial que juega el SM en la biomecánica de la rodilla y la afectación por las técnicas quirúrgicas reparadoras), existe una implicación directa del SM en las lesiones meniscales que afectan al cuerno posterior del menisco, tanto en las llamadas lesiones en rampa, como en las desinserciones del cuerno posterior [77].

En relación con la columna lumbar

La inserción proximal del SM en la tuberosidad isquiática, al igual que la del ST y de la CLBF, comporta una implicación biomecánica directa sobre la pelvis y, por extensión, sobre el raquis, especialmente en su componente lumbar, puesto que la acción de estos 3 músculos en cadena cinética cerrada y de manera concéntrica, comporta una retroversión de la pelvis, así como una

tendencia a la posteriorización ilíaca [61–63], facilitando que el sacro se verticalice y favoreciendo una disminución de la lordosis lumbar [61].

Este hecho, perpetuado de manera continuada e involuntaria debido a una musculatura isquiosural hiperactiva puede llevar a una inclinación pélvica posterior permanente, que conduzca a una alteración de la biomecánica del raquis y que predisponga al dolor lumbar [64].

El dolor lumbar es una afección que experimenta, al menos una vez, más del 80% de las personas en todo el mundo [136]. En Estados Unidos, más del 85% de los casos de dolor lumbar se clasifican como dolor lumbar inespecífico [137]. El dolor lumbar inespecífico se define como dolor lumbar no atribuido a una patología específica reconocible y conocida, como puede ser una infección, tumor, osteoporosis, espondilitis anquilosante, fractura, proceso inflamatorio, síndrome radicular o síndrome de cauda equina, por ejemplo [138]. El dolor lumbar causa una disminución de la movilidad lumbar y una capacidad de marcha limitada, así como un cambio de ritmo en la pelvis, limitaciones que pueden restringir las actividades sociales [138]. Una de las características más estudiadas en pacientes con dolor lumbar inespecífico es la condición de los músculos isquiosurales [139,140]. Un acortamiento de los músculos isquiosurales puede comportar efectos negativos sobre la biomecánica del ritmo lumbopélvico y derivar en una disfunción que puede comportar dolor lumbar inespecífico [141,142], así como una reducción en la fuerza muscular, disfunción del músculo cuádriceps y una alteración de la postura que conduce a cambios en las curvas de la columna [143]. Una tensión excesiva de los músculos isquiosurales puede comportar un aumento de la inclinación pélvica posterior y una reducción de la lordosis lumbar, lo que contribuye a una espalda plana que puede derivar en dolor lumbar [144].

Una de las causas que puede hacer debutar ese dolor lumbar o que puede perpetuarlo debido a una posición pélvica incorrecta es el acortamiento de los músculos isquiosurales [65], así también como hiperactividad de los mismos [64]. La longitud de los músculos isquiosurales está reducida considerablemente en individuos con dolor lumbar pero no ha podido determinarse si el acortamiento muscular es una respuesta como mecanismo de protección contra los movimientos pélvicos, potencialmente dolorosos, o si, por el contrario, el acortamiento sería la causa inicial del dolor lumbar [145].

Por otra parte, dado que la CLBF está conectada al ligamento sacrotuberoso y considerando que la tensión del ligamento sacrotuberoso influye en la cinemática de la articulación sacroilíaca, se ha planteado que la fuerza de este músculo puede influir en la tensión del ligamento sacrotuberoso y que, al hacerlo, puede influir dinámicamente en la estabilidad de las

articulaciones sacroilíacas, por lo que un inadecuado entrenamiento de los isquiosurales (especialmente de la CLBF) influiría negativamente en la articulación sacroilíaca y, por extensión, en la cinemática de la espalda baja [65].

Además de haberse correlacionado el aumento de la inclinación anterior de la pelvis y el aumento de la lordosis lumbar [61,146], se ha estudiado que esta hiperlordosis también está relacionada con la aparición del dolor lumbar, debido a que conduce a un pinzamiento repetitivo de las facetas vertebrales dentro de la columna lumbar y puede derivar en espondilolistesis [147]. Dado que el trabajo de los músculos isquiosurales influye en la posición de la báscula pélvica, debe considerarse la importancia del estado y del trabajo del SM en este aspecto, ya sea tomado de manera aislada y realizando un trabajo analítico o bien formando un todo con el resto de los músculos isquiosurales [65]. Hay estudios que han determinado que un mal estado de los músculos isquiosurales perjudica a los pacientes candidatos a padecer dolor lumbar bajo y que a las personas con inestabilidad pélvica un entrenamiento adecuado de estos grupos musculares les comporta beneficios en lo que respecta al dolor de espalda bajo [65]. Hay estudios que determinan que este hecho tiene una especial importancia en mujeres con inestabilidad pélvica [148].

Por otra parte, se ha demostrado que el limitado rango de movimiento en la elevación pasiva de la pierna estando ésta con extensión de rodilla en pacientes con dolor lumbar inespecífico y la falta de extensibilidad de los músculos isquiosurales no se acompaña de una mayor rigidez o tensión de estos músculos, por lo que es la disminución de la extensibilidad y no la rigidez o la tensión muscular el factor limitante en este tipo de pacientes [139]. De igual manera, se ha observado que los programas de ejercicios de estiramiento estático son más efectivos que los de fortalecimiento muscular en posición de elongación para mejorar el equilibrio dinámico en pacientes con dolor lumbar con tensión en los músculos isquiosurales [142].

De este modo, la condición del SM, como miembro del grupo de los músculos isquiosurales que es, se incluye en estas conclusiones cuando se consideran todos ellos como un mismo grupo de trabajo conjunto, sinérgico y agonista, en relación a la biomecánica lumbopélvica y al dolor lumbar bajo de características mecánicas [65].

Por otra parte, y a pesar de ser conocidas las diferencias anatómicas entre los diferentes músculos isquiosurales y de haberse probado también que el SM, el ST y la CLBF no tienen la misma respuesta electromiográfica en sus acciones sobre la pelvis en el momento de la marcha con la parte superior del cuerpo en posición neutra, que anteriorizada o posteriorizada [149], no

se han constatado diferencias individuales significativas entre ellos en lo que al dolor lumbar inespecífico respecta.

Síndrome de los isquiotibiales

Existe una gran proximidad anatómica entre los músculos isquiosurales y el nervio ciático y entran en contacto en diferentes puntos de su recorrido a lo largo de la parte posterior del muslo [50]. Este hecho puede comportar una situación de atrapamiento de dicho nervio por estructuras fibrosas asociadas a estos músculos, especialmente en la zona tendinosa, cerca de su inserción proximal. Esta afección es conocida como “síndrome de los músculos isquiotibiales” y, aunque no se presenta en los libros de texto estándares, no es una entidad patológica excesivamente rara [150]. Las personas afectadas (generalmente atletas de alta competición) pueden presentar dolor en la tuberosidad isquiática y en el músculo glúteo mayor que puede irradiarse hasta la fosa poplítea, asociado (o no) a debilidad de los músculos isquiosurales [151]. En estos pacientes el dolor suele presentarse al sentarse, estirar la pierna afectada y/o al correr [152]. En ocasiones, la complejidad del cuadro y la no mejora de la sintomatología con métodos conservadores obliga, incluso, a optar por tratamientos quirúrgicos de liberación de la estructura neural, obteniéndose buenos resultados tras la cirugía, tanto en lo que respecta a la mejora del dolor como de la fuerza [150–152].

En base a lo expuesto, y dadas sus características anatómicas en su inserción proximal, el “síndrome de los músculos isquiotibiales” es otra de las entidades clínicas en las que el SM puede tener una implicación directa [150–152].

1.2.4 Estudio del músculo semimembranoso por la imagen

Para la localización anatómica de las estructuras descritas hasta ahora y el diagnóstico y seguimiento de las lesiones descritas en los apartados anteriores donde existe una implicación del complejo miotendinoso del SM, son de gran ayuda la resonancia magnética [11,36,38,39,41,44,55] y el estudio ecográfico [7,10,50,51,56,153].

Resonancia Magnética

Diversos estudios constatan que la resonancia magnética es un buen método de exploración de las inserciones de la pata de ganso profunda y facilita el diagnóstico de lesiones [11,12,36,38,39,41,44,55,74,154], estando incluso descritas las mejores proyecciones para la

localización de cada inserción tendinosa y para la visualización de su relación con las estructuras adyacentes [11,75]. Algunos autores han realizado estudios comparando los resultados obtenidos mediante disección anatómica y resonancia magnética. En ellos, mediante disección anatómica han localizado seis inserciones del tendón distal del SM: tendón directo, tendón anterior, extensión del ligamento oblicuo posterior, extensión del ligamento poplíteo oblicuo, expansión tibial distal (aponeurosis poplíteas) y tendón meniscal, que previamente habían visualizado mediante RMN, y describieron que las imágenes de las proyecciones axiales de RMN permitían mostrar cinco de esas seis inserciones: tendón directo, tendón anterior, extensión del ligamento oblicuo posterior, extensión del ligamento poplíteo oblicuo y expansión tibial distal (aponeurosis poplíteas).

Respecto a la rama inconstante de inserción en el cuerno posterior del menisco descrita a través de la disección por algunos autores [41], no se ha podido identificar mediante RMN [12].

Ecografía

De igual manera que la RMN, también la exploración ecográfica ha demostrado ser válida para el estudio del SM [50,51,56,155] y en algunos casos se postula como el método de elección, incluso por encima de la resonancia magnética, ante determinadas lesiones que afectan la inserción distal de este músculo [51,56].

Sin embargo la exploración ecográfica de los músculos isquiosurales es más complicada que en otras regiones anatómicas [50], debido a que tienen una anatomía compleja [50,156]. Por ejemplo, respecto al tendón proximal del SM cabe apuntar que en ocasiones puede ser difícil de identificar en las imágenes ecográficas por tener un grosor variable [20]. Esto se ve más dificultado debido a la ventana acústica relativamente pobre que ofrece el músculo glúteo mayor, multifascicular y la capa de tejido celular subcutáneo que se encuentra en esta zona [20]. Clásicamente, el estudio ecográfico de la musculatura isquiosural se ha valido de puntos de referencia óseas así como de un conocimiento previo de la anatomía topográfica [50,156,157], por lo que para interpretar correctamente el estudio por la imagen de esta zona se precisa un buen conocimiento anatómico de las estructuras exploradas [7,10,50,104].

Con la finalidad de facilitar el estudio ecográfico de los músculos isquiosurales de una manera sistematizada, se ha propuesto dividir las estructuras anatómicas del compartimento posterior del muslo en cuatro áreas de interés y, una vez hecha esta división, identificar unos puntos de referencia específicos que faciliten la localización de las estructuras anatómicas más relevantes

en cada zona. Estas áreas son: la zona de la inserción proximal de los músculos isquiosurales (formada por el tendón común del BF y del ST y el tendón del SM), la mitad proximal (compuesta principalmente por los vientres del BF y del ST, así como por el tendón del SM), la mitad distal medial (formada por los vientres del ST y del SM) y la mitad distal lateral (formada por el vientre del BF) [50]. Teniendo en consideración estos elementos, los autores de esta propuesta de protocolo recomiendan iniciar la exploración por la inserción proximal y, con el paciente en decúbito prono, proseguir con la visualización de las estructuras en dirección distal. En cada una de las áreas descritas, los puntos de referencia a tener en cuenta son: el nervio ciático, el tendón conjunto y el tendón del SM, en la zona proximal; el nervio ciático y el tendón del SM, en la mitad proximal; el nervio ciático en la mitad distal lateral, siguiendo su trayecto distalmente en el eje corto; y, en la mitad distal medial, las relaciones volumétricas entre el SM y el ST, siendo mayor la masa del ST que la del SM a un nivel más proximal y a la inversa a un nivel más distal [50].

2.- HIPÓTESIS

2.- HIPÓTESIS

El exhaustivo conocimiento ecográfico, anatómico e histológico del músculo semimembranoso y de su inserción proximal y distal facilitaría su identificación e interpretación ecográfica para el posible diagnóstico de lesiones a través de la imagen.

3.- OBJETIVOS

3.- OBJETIVOS

Principal:

1. Estudiar ecográfica, anatómica e histológicamente el músculo semimembranoso, con especial detenimiento en su inserción proximal y distal.

Específicos:

1. Describir la inserción proximal del músculo semimembranoso y sus relaciones anatómicas.
2. Detallar las inserciones distales del músculo semimembranoso y sus relaciones anatómicas.
3. Estudiar las relaciones del músculo semimembranoso con la fascia del muslo.
4. Describir las inserciones de la pata de ganso profunda visibles mediante ecografía.
5. Explicar las posibles diferencias histológicas entre los distintos tendones de las inserciones distales del músculo semimembranoso.
6. Establecer un patrón normal de las inserciones proximales y distales del músculo semimembranoso para poder interpretar las imágenes ecográficas, y sus posibles variaciones y patologías.

4.- MATERIAL, MÉTODOS Y RESULTADOS

4.- MATERIAL, MÉTODOS Y RESULTADOS.

4.1 Artículo 1

Resumen del artículo 1

Título:

Anatomical relationships of the proximal attachment of the hamstring muscles with neighboring structures: from ultrasound, anatomical and histological findings to clinical implications.

Antecedentes del tema:

El músculo semimembranoso forma parte del grupo de los músculos isquiosurales y, aunque ya ha sido estudiado anatómicamente, la descripción de sus inserciones es aún controvertida. A nivel proximal, se discute si su inserción forma parte o no del tendón conjunto de los músculos semitendinoso y de la cabeza larga del bíceps femoral, cual es la localización de dicho tendón o cual es la forma de su huella en la tuberosidad isquiática. En relación a este músculo y sus inserciones, hay descritas múltiples patologías y se ha constatado que la ecografía es un método válido de estudio para su diagnóstico y manejo. Sin embargo, para la correcta interpretación de las imágenes se precisa un buen conocimiento anatómico de las estructuras implicadas.

Hipótesis: El exhaustivo conocimiento anatómico e histológico del músculo semimembranoso y de su inserción proximal facilitaría su identificación e interpretación ecográfica para el posible diagnóstico de lesiones a través de la imagen.

Objetivos: Estudiar ecográfica, anatómica e histológicamente el músculo semimembranoso, con especial detenimiento en su inserción y proximal.

Metodología:

Se realizó un estudio observacional descriptivo en 97 hemipelvis de 66 especímenes adultos (37 mujeres y 60 hombres), criopreservadas a -20°C y provenientes de cadáveres donantes de la Sala de Disección de la Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud, campus de Bellvitge, de la Universitat de Barcelona. En primer lugar se realizó un estudio ecográfico del origen de los músculos isquiosurales a nivel de la tuberosidad isquiática, enfocándose en los músculos

semimembranoso y cabeza larga del bíceps femoral y su relación con otras estructuras anatómicas como el músculo aductor mayor y el nervio ciático; posteriormente se realizó el estudio anatómico; y en tercer lugar se llevó a cabo un estudio histológico del retináculo y expansión sobre el nervio ciático. El orden de numeración de las muestras fue progresivo a medida que se iban estudiando.

Resultados:

El estudio ecográfico ha permitido observar que la inserción proximal de los músculos isquiosurales presenta una línea hiperecogénica que rodea el origen del semimembranoso y la cabeza larga del bíceps femoral, así como otra línea hiperecogénica que recubre el nervio ciático. El estudio anatómico e histológico confirma los resultados de la ecografía y muestra diferentes capas que forman el ligamento sacrotuberoso. Además, muestra que la inserción proximal del músculo semimembranoso tiene un origen más proximal que el resto de los músculos isquiosurales y que este músculo comparte fibras con la cabeza larga del bíceps femoral y se expande hasta el músculo aductor mayor. El análisis histológico también muestra el tejido conectivo denso del retináculo que recubre la cabeza larga del bíceps femoral y los músculos semimembranoso, así como la expansión que recubre el nervio ciático.

Los resultados del estudio estadístico no revelaron diferencias estadísticamente significativas en lo que respecta a la edad y sexo de los especímenes, ni a la lateralidad de las extremidades estudiadas.

Conclusiones: Los resultados obtenidos pueden ayudar a explicar parte de las lesiones en la inserción proximal de los músculos isquiosurales y, más concretamente, en la del músculo semimembranoso.

Article

Anatomical Relationships of the Proximal Attachment of the Hamstring Muscles with Neighboring Structures: From Ultrasound, Anatomical and Histological Findings to Clinical Implications

Maribel Miguel-Pérez ^{1,*}, Pere Iglesias-Chamorro ^{1,2}, Sara Ortiz-Miguel ^{2,3,4,5}, Juan-Carlos Ortiz-Sagrìstà ⁶, Ingrid Möller ¹, Joan Blasi ⁷, Josep Agullò ¹, Carlo Martinoli ⁸ and Albert Pérez-Bellmunt ^{2,5}

- ¹ Unit of Human Anatomy and Embryology, Department of Pathology and Experimental Therapeutics, Faculty of Medicine and Health Sciences (Bellvitge Campus), Universitat de Barcelona, 08907 Barcelona, Spain; centretars@centretars.com (P.I.-C.); ingridmoller@ub.edu (I.M.); jlagullo-1@ub.edu (J.A.)
- ² Basic Sciences Department, Universitat Internacional de Catalunya, 08017 Barcelona, Spain; sara.mortiz@ub.edu (S.O.-M.); aperez@uic.cat (A.P.-B.)
- ³ ACTIUM Functional Anatomy Group, Sant Cugat del Vallès, 08195 Barcelona, Spain
- ⁴ Unit of Human Anatomy and Embryology, Department of Surgery and Medical-Surgical Specialties, Faculty of Medicine and Health Sciences (Clinic Campus), University of Barcelona, 08036 Barcelona, Spain
- ⁵ Euses, Bellvitge Campus, Universitat de Barcelona, 08907 Barcelona, Spain
- ⁶ Anesthesia Department, Fundació Puigvert, 08025 Barcelona, Spain; siometge@gmail.com
- ⁷ Unit of Histology, Department of Pathology and Experimental Therapeutics, Faculty of Medicine and Health Sciences (Bellvitge Campus), Universitat de Barcelona, 08907 Barcelona, Spain; blasi@ub.edu
- ⁸ Dipartimento di Scienze della Salute, Università di Genova, 16126 Genoa, Italy; carlo.martinoli@unige.it
- * Correspondence: mimiguel@ub.edu; Tel.: +34-93-4020170



Citation: Miguel-Pérez, M.; Iglesias-Chamorro, P.; Ortiz-Miguel, S.; Ortiz-Sagrìstà, J.-C.; Möller, I.; Blasi, J.; Agullò, J.; Martinoli, C.; Pérez-Bellmunt, A. Anatomical Relationships of the Proximal Attachment of the Hamstring Muscles with Neighboring Structures: From Ultrasound, Anatomical and Histological Findings to Clinical Implications. *Diagnostics* **2024**, *14*, 1725. <https://doi.org/10.3390/diagnostics14161725>

Academic Editor: Aristeidis H. Zibis

Received: 30 June 2024

Revised: 22 July 2024

Accepted: 5 August 2024

Published: 8 August 2024

Abstract: Background: Injuries of the proximal attachment of the hamstring muscles are common. The present study aimed to investigate the relationship of the proximal attachment of the hamstring muscles with neighboring structures comprehensively. Methods: A total of 97 hemipelvis from 66 cryopreserved specimens were evaluated via ultrasound, anatomical and histological samples. Results: The proximal attachment of the hamstring muscles presents a hyperechogenic line surrounding the origin of the semimembranosus and the long head of the biceps femoris muscles, as well as another hyperechogenic line covering the sciatic nerve. The anatomical and histological study confirms the ultrasound results and shows different layers forming the sacrotuberous ligament. Furthermore, it shows that the proximal attachment of the semimembranosus muscle has a more proximal origin than the rest of the hamstring muscles. Moreover, this muscle shares fibers with the long head of the biceps femoris muscle and expands to the adductor magnus muscle. The histological analysis also shows the dense connective tissue of the retinaculum covering the long head of the biceps femoris and semimembranosus muscles, as well as the expansion covering the sciatic nerve. Conclusions: These anatomical relationships could explain injuries at the origin of the hamstring muscles.

Keywords: hamstring; adductor magnus; ischial tuberosity; sacrotuberous ligament; biceps femoris; musculoskeletal; tendinopathy; sciatic nerve; ultrasound



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The ischial tuberosity is a sizeable round protrusion at the inferoposterior aspect of the ischium of the coxal bone and is an origin of powerful muscle groups [1]. The semimembranosus (SMB), the long head of the biceps femoris (LHBF) and the semitendinosus (ST) muscles, forming the hamstrings muscles, have their proximal attachment in this zone [2], which is the most frequently injured area of these muscles [3–6].

For clinical implications, the anatomy of this zone has been re-examined and re-analyzed recently by different studies. Some studies have described an annular structure

surrounding the hamstring muscles [7], or the presence of an anatomical and histological continuity between the LHBF and the sacrotuberous ligament (STL) [8] with similar ratios of collagen and elastic fibers between this ligament and the LHBF [9]. The morphometry, morphology and relationships of the proximal attachment of the hamstring muscles have also been analyzed [10–13]. However, these recent investigations still have not described possible anatomical relationships that could explain some specific pathologies or pathological associations.

An essential aspect of clinical diagnosis following an injury is to visualize the muscles through radiological methods. It is the gold standard to confirm their normality and check the severity and prognosis of the hamstring injury [14]. One of the most widely used techniques for imaging the proximal hamstrings is ultrasound scanning [15–17]. However, despite the importance of these muscles and their new connections described in recent studies, there are no studies that have used ultrasound to describe the new anatomical findings to the best of our knowledge.

The current study aimed to broaden the ultrasound and anatomical knowledge of the attachment of different structures in the ischial tuberosity, focusing on the proximal attachment of the hamstring muscles and its relationships with other anatomical structures. This information may help the exploration, clinical assessment and treatment of the different anatomical structures with anchorage at this point.

2. Materials and Methods

This study was performed on specimens from 97 hips (37 females and 60 males) from 66 adult humans with a mean age of 78.6 years at death. The specimens were cryopreserved at -20°C in the dissection room before we studied them at ambient temperature. All 97 ischial tuberosities and proximal attachments of the hamstring muscles were analyzed. There was no evidence of deformities, traumatic injury or surgical scarring in any of the specimens studied. The body donor signed a document to participate in the body donation program of the Faculty of Medicine and Health Sciences. Appropriate consent was obtained and approved by the local ethics committee. This study was conducted in accordance with the principles of the Declaration of Helsinki.

This study consisted of three stages: the first stage was an ultrasound study of the origin of hamstring muscles at the ischial tuberosity focusing on the semimembranosus and long head of the biceps femoris muscles and their relationship with other anatomical structures as the adductor magnus muscle and sciatic nerve; the second stage was the anatomical study; and the third stage was a histological study of the retinaculum and expansion over the sciatic nerve.

2.1. Ultrasound Study

The ultrasound study was performed with a General Electric LOGIQ P6 and P9 ultrasound scanner (GE Ultrasound Korea. Ltd., Seongnam, Republic of Korea) with a high-frequency 6–15 MHz linear probe that was lower in the obese specimens. The specimens were lying prone, with their feet hanging off their stretched legs. The posterior axial planes are the most useful for visualizing the ischial tuberosity and the insertion of the proximal origin of the tendons of the hamstring muscles on its lateral aspect, as recommended by the European Society of Musculoskeletal Radiology [18]. After locating the ischiatic tuberosity with the probe in the short axis, the origin of the hamstring muscles was located. With the probe in this position, the medial and lateral facet of the ischial tuberosity was visualized. In this position, the LHBF and SMB were identified, although the probe was moved $30\text{--}45^{\circ}$ clockwise on the right side and on the left side in some specimens to try to identify the classical image described by the European Society of Musculoskeletal Radiology after the STL and the origin of the SMB and LHBB had been identified. Guided by ultrasound and parallel to the probe, 3 mL of dye (1 mL of a red or green dye with 2 mL of saline) was injected with a 20 G needle at the SMB and LHBF. Also, the superior insertion of the SMB was located with the probe in the long axis, and 3 mL of the dye was injected at this point.

The relationship between the sciatic nerve and the hamstring origin was studied in relation to the retinaculum above the hamstring origin. At this last lateral point, 3 mL of the red dye was injected, guided by ultrasound.

The thicknesses of the retinaculum and expansions covering the sciatic nerve were measured.

2.2. Anatomical Procedure

The anatomical study was carried out using two different techniques. A total of 85 hemipelves were analyzed via anatomical dissection, while 11 was analyzed using sectional anatomy. At each step, photographs were taken to record information (Canon EOS 60D, Kyocera Kabushiki-kaisha, Ota, Tokyo, Japan).

2.2.1. Dissection Procedure

The dissection of the proximal attachment of the hamstring muscles was performed stratigraphically in all the specimens, with special care taken to locate and prove that the dye was in the correct tendon. The anatomical dissection was performed following the classic method in planes with a longitudinal medial incision made in the middle posterior line of the body and two horizontal incisions made at the iliac crest and in the middle of the posterior side of the thigh. The gluteus maximus was then removed from the medial origin to the lateral insertion on the femur. The correct localization of the dye, the relationship between the proximal attachment of these muscles and the ischial tuberosity and the relationships between them and their surrounding connective and fascial tissues were meticulously examined, especially the connections with the STL and the sciatic nerve.

2.2.2. Anatomical Sections

Ten hemipelves from five specimens were used to make transversal anatomical cross-sections at the level of the ischial tuberosity.

2.3. Histological Study

In 7 randomly chosen specimens, we collected samples of comparable size (2 cm × 2 cm) from the STL in association with the LHBB, the retinaculum over LHBB and SMB and the expansions covering the sciatic nerve. The samples were fixed in 4% formaldehyde, processed into paraffin blocks and cut into 4 µm sections before being dyed with a hematoxylin-eosin stain. The thicknesses of the retinaculum and expansions were measured with a Leica digital microimaging device (Leica DMD108 microscope, Leica Microsystems GmbH, Wetzlar, Germany).

The thicknesses of the retinaculum and expansions covering the sciatic nerve were measured.

2.4. Statistical Analysis

Statistical analysis of the thicknesses of the retinaculum and the expansion of the sciatic nerve was performed in 43 specimens (17 females and 26 males; 20 right and 23 left side) on all the data obtained for the control variables (i.e., sex, limb side and age) and the anthropometric variables.

The qualitative variables were presented as absolute and relative frequency; quantitative variables were presented as the median and interquartile range (IQR) and the mean with standard deviation. The Shapiro–Wilk test was used to study the existence of normal distribution in quantitative variables. The relationship between categorical and quantitative variables is carried out through Student's T-test (normal distribution) or Mann–Whitney U test (non-normal).

3. Results

In total, 97 ischial tuberosities and proximal attachments of the hamstring muscles from 66 cryopreserved specimens (37 females and 60 males; 53 right and 44 left sides)

with a mean age of 78.6 (range 48–89 years) were analyzed. Measurements were recorded in 43 specimens. Among these, 26 were from men (60.5%) and 17 were from women (39.5%), while 20 were right-sided (46.5%) and 23 were left-sided (53.5%). The thickness measurements of the retinaculum and expansion over the sciatic nerve via ultrasound were 0.57 mm and 0.20 mm, respectively (Table 1). Statistical analysis showed that neither gender nor laterality affected these measures. (Tables 2 and 3).

Table 1. Morphometry of the retinaculum (RT) and expansion over the sciatic nerve (ESN) in mm.

Parameters	Thickness RT (mm)	Thickness ESN (mm)
Average (SD)	0.57 (0.094)	0.20 (0.08)
95% CI	0.54–0.60	0.18–0.22
Median (IQR)	0.56 (0.12)	0.17 (0.11)
Shapiro–Wilk Test	0.941; $p = 0.029$	0.894; $p = 0.001$

Table 2. Distribution of the thickness of retinaculum (RT) and expansion over the sciatic nerve (ESN) according to the sex.

Sex	RT (mm)		ESN (mm)	
	Average (SD)	95%CI	Average (SD)	95%CI
Man	0.58 (0.098)	0.54 to 0.61	0.20 (0.08)	0.17 to 0.24
Woman	0.55 (0.086)	0.51 to 0.60	0.20 (0.07)	0.16 to 0.23
Mann–Whitney U Test	188.0; $p = 0.411$		233.0; $p = 0.764$	

Table 3. Distribution of the thickness of retinaculum (RT) and expansion over the sciatic nerve (ESN) according to the side.

Side	RT (mm)		ESN (mm)	
	Average (SD)	95%CI	Average (SD)	95%CI
Right	0.57 (0.11)	0.53–0.62	0.19 (0.06)	0.16–0.22
Left	0.56 (0.081)	0.53–0.60	0.21 (0.08)	0.18–0.25
Mann–Whitney U Test	232.0; $p = 0.961$		259.5; $p = 0.469$	

Ultrasound showed two hyperechogenic lines, lateral and media, corresponding to the ischial tuberosity. In the lateral line, the proximal origin of the SMB and LHBF were observed as two round hyperechogenic structures (contiguous and adjacent to one another), similar to a mask (Figure 1). The superomedial structure corresponded to the LHBF tendon, while the inferolateral structure corresponded to the SMB tendon (Figure 1). However, in some cases (30 from 97 hemipelvis (32.3%)), this image was not clear, and the probe had to be turned 30° with respect to the short axis (anticlockwise on the right side and clockwise on the left side). In 25.5% (38 from 97 cases) of the specimens, the SMB, and even the LHBF, did not show a well-defined structure and presented several hyperechogenic structures that were compatible with a degeneration of the tendon (Figure 2). In these specimens, the dye had spread more. In all the specimens, both tendons (SMB and LHBF) were surrounded and isolated by a hyperechogenic line that fixed them to the bone (Figure 3). The thickness of this line was 0.57 mm (Table 1).

From this point, when the probe was moved laterally in the short axis, it was possible to visualize a very thin hyperechogenic line ranging from the ischial tuberosity and the origin of the hamstrings to the gluteus maximus muscle that covered the passageway of the sciatic nerve and the posterior femoral cutaneous nerve (Figure 4). The thickness of the expansion was 0.2 mm (Table 1).

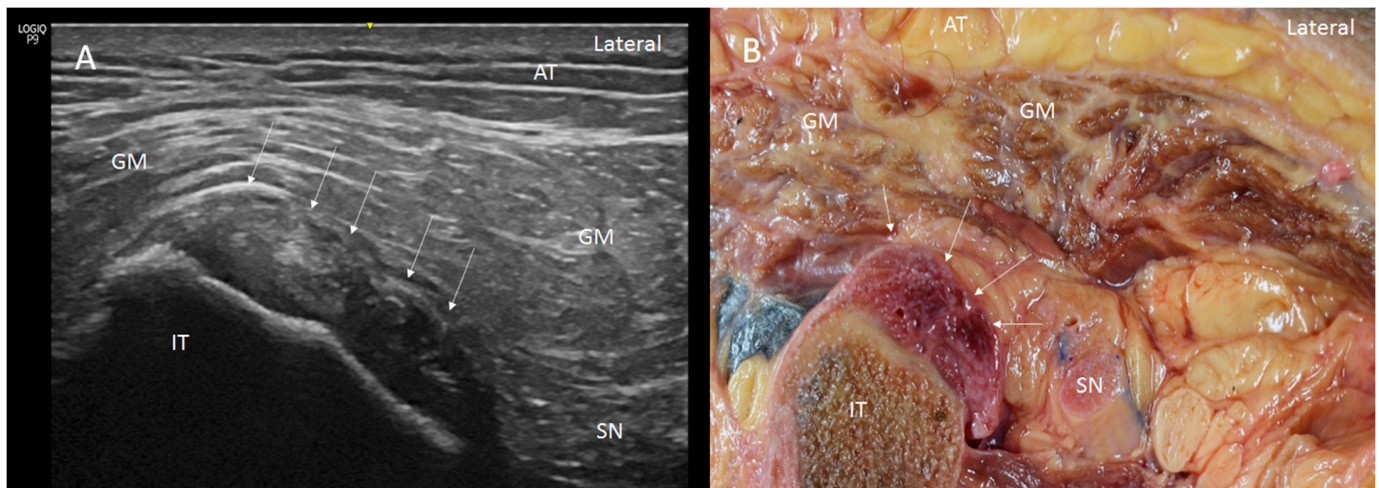


Figure 1. (A) Ultrasound view in short axis of the right tendon of long head of biceps femoris (LHBF) and semimembranosus (SMB) muscles seen as two round hyperechogenic structures similar to a mask or the shape of a goat's leg at the ischial tuberosity (IT). They are surrounded and isolated by a hyperechogenic line that fixed them to the bone (white arrows). Adipose tissue (AT), gluteus maximus muscle (GM), sciatic nerve (SN), (B) Anatomical section of the hip showing the LHBF and SMB tendons fixed by the retinaculum (white arrows).

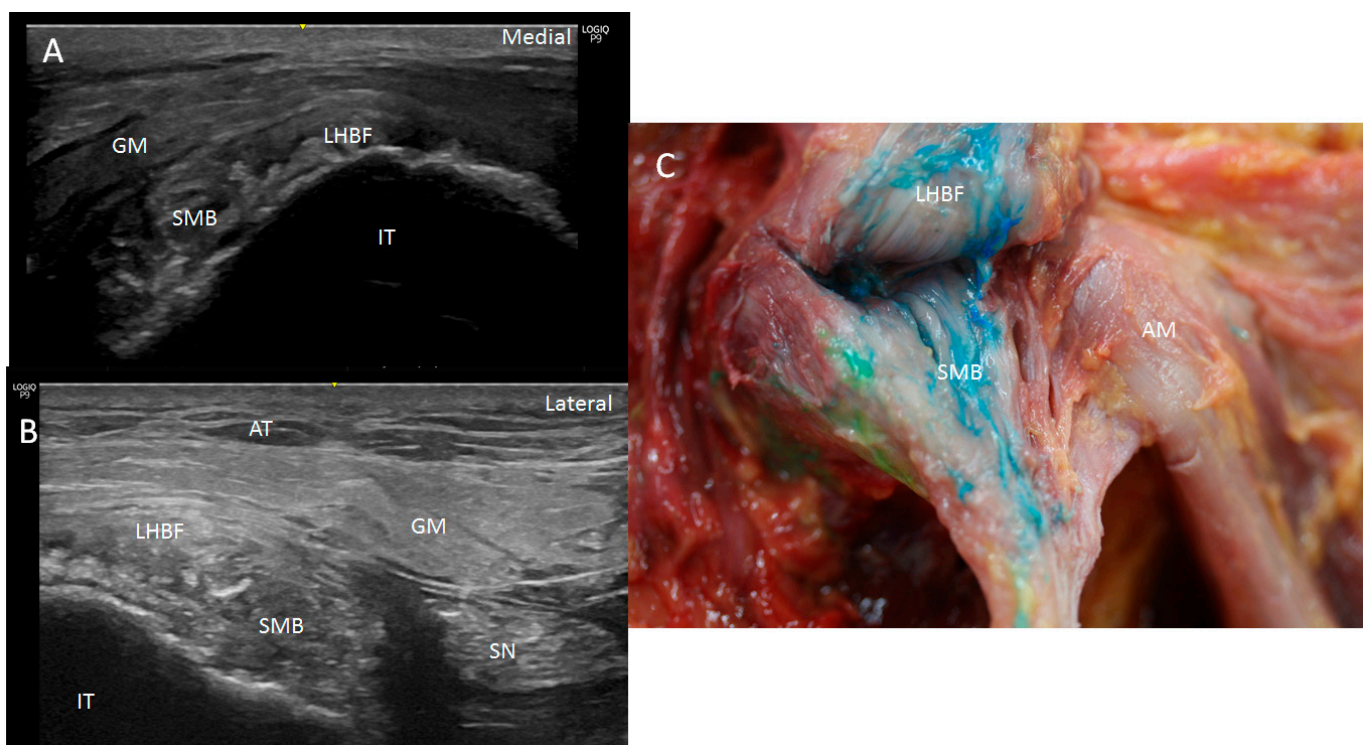


Figure 2. (A,B) Two ultrasound examples in the short axis of the tendons of the long head of biceps femoris (LHBF) and the semimembranosus (SMB) muscles, presenting an irregular origin at the ischial tuberosity (IT) with several hyperechogenic structures that were compatible with a degeneration of the tendon: (A) left side; (B) right side. (C) Dissection of the left area showing, after moving the LHBF, a very irregular insertion of the tendon of the SMB with all the blue dye widespread. AM: adductor maximus muscle.

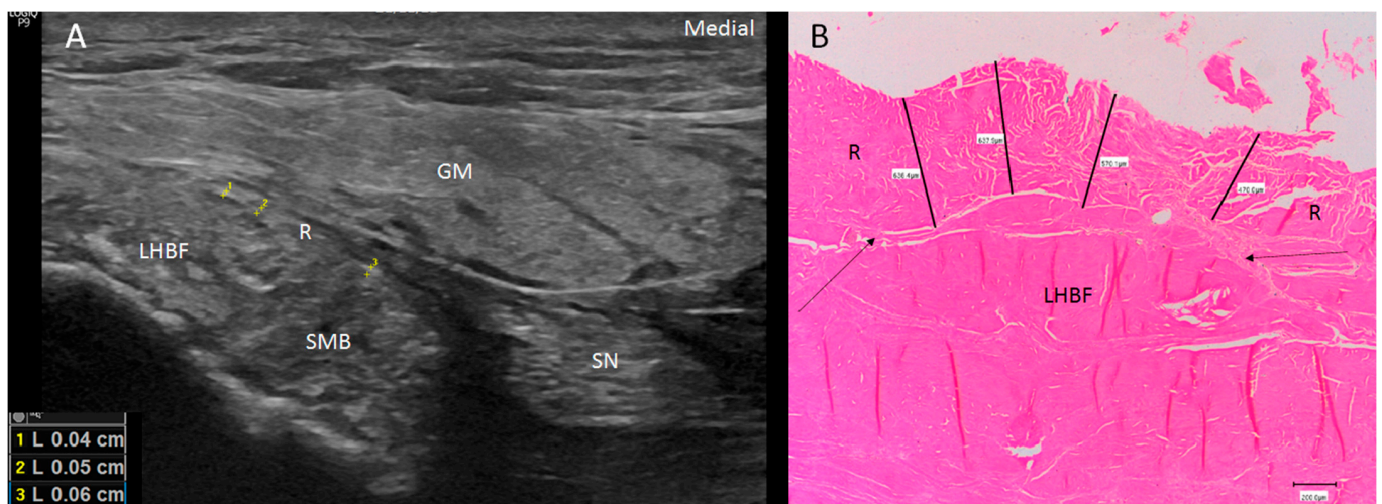


Figure 3. (A) Ultrasound view of the retinaculum (R) as a hyperechogenic line that fixed them to the bone (as well as the different points where it was measured (yellow numbers 1, 2 and 3). Tendon of long head of biceps femoris (LHBf) and semimembranosus muscle (SMB). Right side: gluteus maximus muscle (GM). (B) Histological view of the retinaculum and its measures of 636.4 μ , 637.9 μ , 570.1 μ and 470 μ . It is composed of dense connective tissue, and it is possible to observe the perpendicular direction of its fibers with the fibers of the tendon of LHBf and their close relation (black arrows).

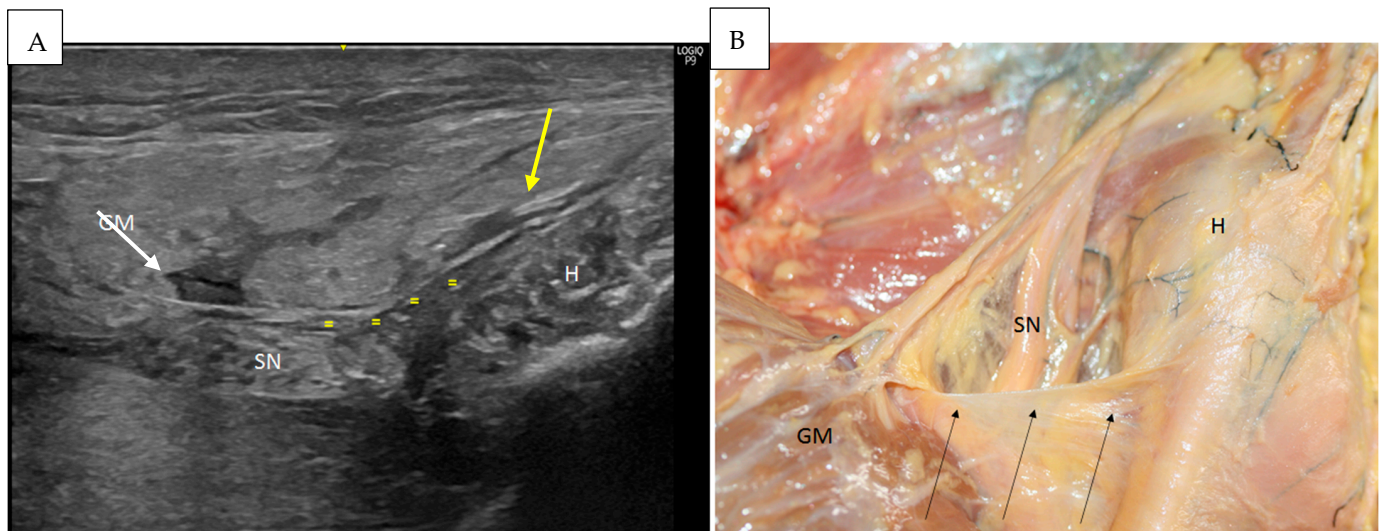


Figure 4. (A) The expansion over the sciatic nerve (SN) on the left side. An ultrasound study allows us to visualize this expansion (yellow =), which goes from the origin of the hamstrings (H) (yellow arrow) to the gluteus maximus muscle (GM) (white arrow). IT: Ischial tuberosity. (B) Anatomical study allowing us to see this expansion (black arrows) over the sciatic nerve on the left side. It is possible to visualize that it goes from the origin of the hamstrings (H) (yellow arrow) to the gluteus maximus muscle (GM) (white arrow).

When the ultrasound study of the specimen was followed inferiorly, we observed that the LHBf was always more superficial and posterior, and the SMB tendon turned to the medial position. SMB went to a deep and medial position in the anterior face of the ST origin. At this point, we observed the muscular fibers of the ST occurring medially to the LHBf and covering the SMB tendon.

When the probe followed the SMB superiorly in the short axis, we observed its long and superior insertion, showing a deep relationship with the LHBF, quadratus and obturator internus muscles (Figures 5 and 6).

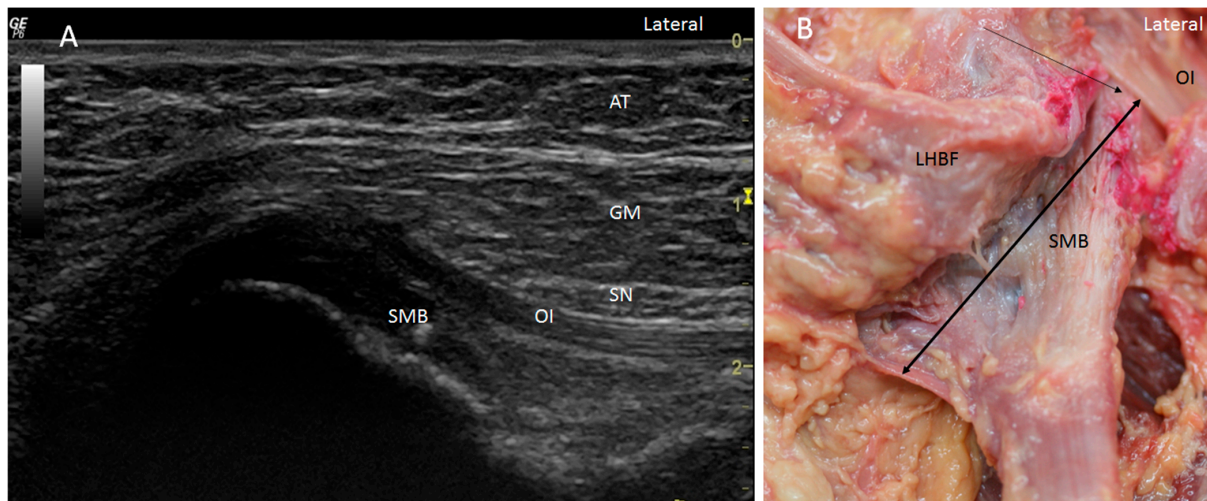


Figure 5. (A) Ultrasound study in the short axis on the right side showing the high origin semimembranosus muscle (SMB). It goes up even as far as to be placed under the obturator internus muscle (OI). SN: sciatic nerve GM: gluteus maximus muscle; AT: adipose tissue. (B) Anatomical view of the long and high origin of the tendon of the SMB (black arrow) under the OI after moving the LHBF medially on the right side.

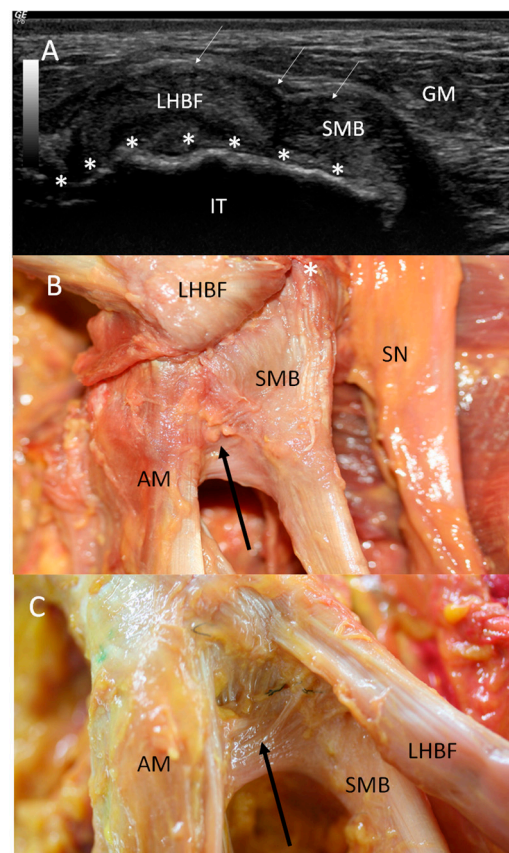


Figure 6. (A) Ultrasound view in the short axis showing the high origin of the right tendon of the semimembranosus muscle (SMB) (white *) at the ischial tuberosity (IT). LHBF: the tendon of the long

head of biceps femoris; white arrow: retinaculum (white arrow); GM: gluteus maximus muscle. (B) Anatomic view of the origin after moving up the LHBF; it is possible to visualize the high origin of the SMB (white *) and the deep connections (black arrow) with the origin of the adductor maximus muscle (AM) (laterally, the sciatic nerve). (C) Anatomic view to observe the deep relation between LHBF and the SMB and the SMB and AM (black arrow). Both anatomical views are on the right side.

With respect to the STL, it was observed as a hyperechogenic structure under the gluteus maximus that continued with the LHBF in the short and long axes (Figure 7A). Moreover, it is possible to observe in the short axis a small fossa, just at the vertex of the ischial tuberosity, in association with the STL (Figure 8A).

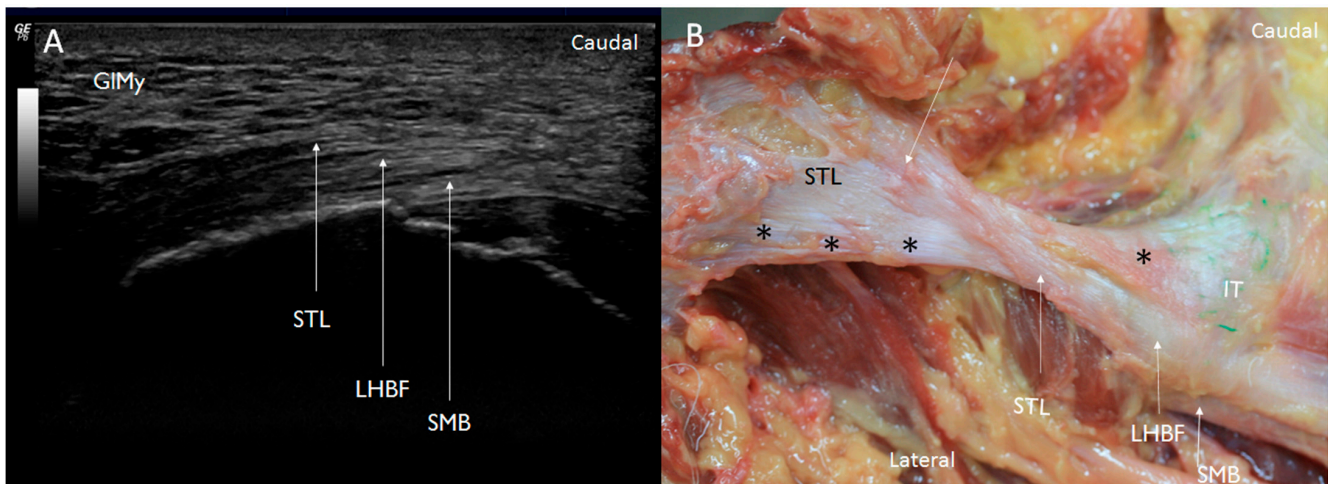


Figure 7. (A) Ultrasound view at the long axis showing that the left sacrotuberous ligament (STL) is seen as a hyperechogenic structure that continues caudally with the tendon of the long head biceps femoris (LHBF). Also, the tendon of the semimembranosus muscle is located as a hyperechogenic structure under LHBF. GIMy: Gluteus maximus muscle (B) Anatomical dissection showing that the fibers of the left STL cross between them with a lambda (λ)-shaped bifurcation. Then, the superficial and medial side of the STL (white arrow) goes on caudally with the LHBF. Moreover, it is possible to observe that the lateral and the deeper part of the sacrotuberous ligament inserts at the ischial tuberosity (black *), showing an x shape. The deeper layers of the ligament (black *) insert at the ischial tuberosity (IT).

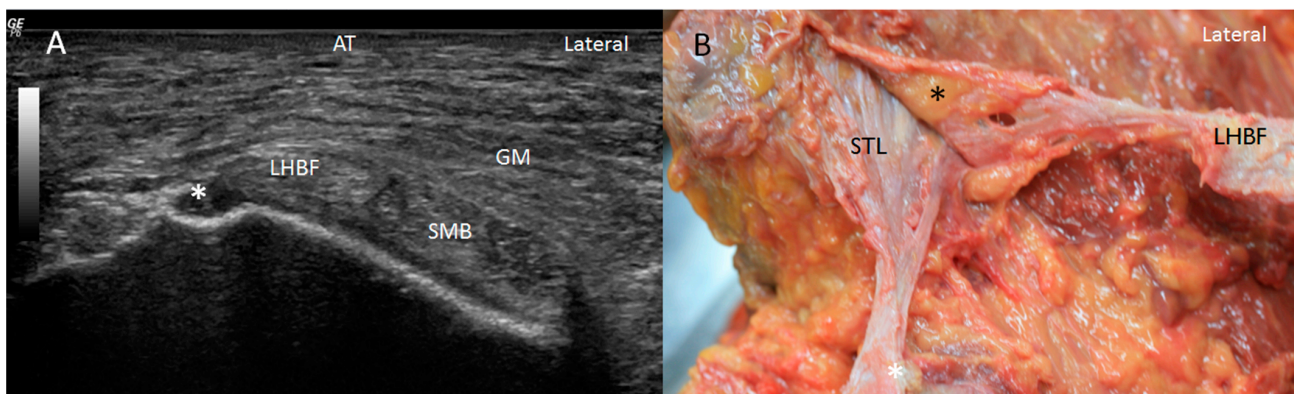


Figure 8. (A) Ultrasound view of the sacrotuberous ligament insertion at the vertex (white *) of the ischial tuberosity (IT) in the short axis tendon of the semimembranosus muscle (SMB) on the right side (gluteus maximus muscle). AT: Adipose tissue. (B) Anatomical dissection of the sacrotuberous ligament on the right side showing the possibility to separate different layers of the STL. The most superficial layer of the STL (black *) follows with the LHBF, and it is separated from the deep layer with adipose tissue (black *) and other layers of the STL inserted at the vertex of the IT (white *).

Dissection confirmed the findings of the ultrasound analysis. The SMB and LHBF originated at the lateral side of the ischial tuberosity, and a dense connective tissue, such as a retinaculum, kept the SMB and LHBF tendons fixed to the ischial tuberosity (Figures 1B and 9A–C. When the retinaculum was cut, we observed that the injected dye, guided by ultrasound, was in the right tendon. However, the dye had spread superiorly in the specimens where the SMB did not have a well-defined structure (as seen in the ultrasound analysis) (Figure 2B). Although both tendons had a defined origin at the ischial tuberosity, they presented a tendinous continuity at the middle point of the ischial tuberosity. This contact was more evident at the point where the tendons crossed one another and stronger in the inferior part where the SMB tendon was towards the anterior side of the ST. It was necessary to cut the two tendons to isolate each one. The muscular fibers of the ST were not observed at this point, but a connection between the SMB tendon and the adductor magnus was observed in all the cases (Figure 6B,C).

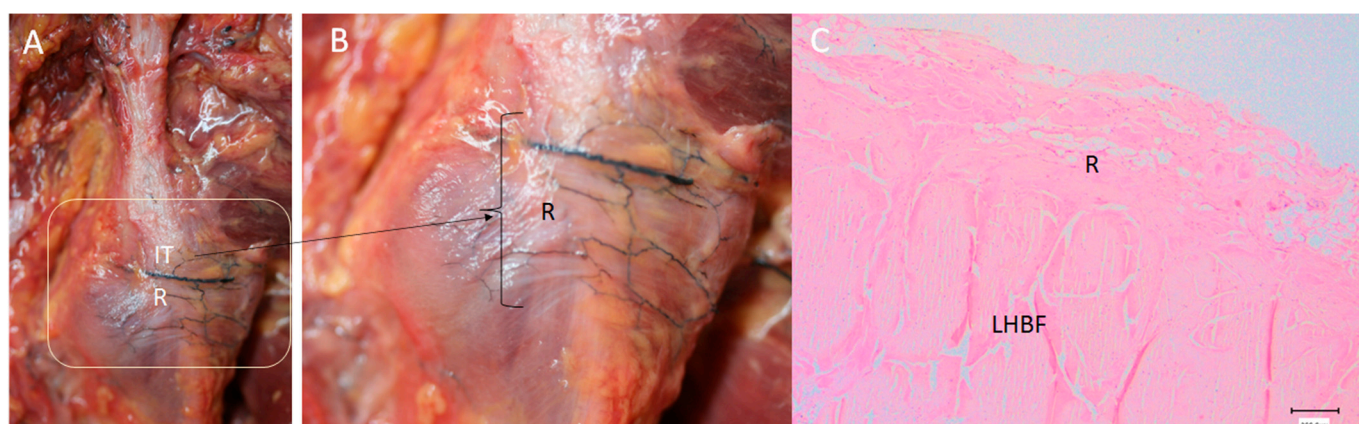


Figure 9. (A) Anatomical view of the retinaculum (R) at the ischial tuberosity (IT) on the right side. (B) It is possible to see the retinaculum increasing with the transversal fibers fixing the origin of the LHBF and SMB (in this case, it is possible to see a transversal black line corresponding to an injected vessel). (C) Histological study showing the retinaculum as dense connective tissue in a very close relation with the LHBF.

After removing the LHBF tendon origin, proximal tendon attachment of the SMB at the lateral side of the ischial tuberosity could be accurately visualized (Figure 5B). It was longer and originated from the lateral side of the ischial tuberosity. It had a rounder shape at the more superior and lateral part, which distally became thinner, presenting an oval shape at the lateral side before becoming flattened medially to assume the shape of a teardrop (Figure 10 and Figure 12). It was covered posteriorly by the ST.

The accurate dissection of the STL showed that it was formed of three layers separated sometimes by adipose tissue and with a lambda (λ)-shaped bifurcation (Figure 7B). The most superficial (or posterior) and more medial layer was continuous with the LHBF superficially (Figure 8B), while the medial layer was inserted as a cord in the vertex of the ischial tuberosity (Figure 10). The deepest and more lateral layer was inserted at the medial side of the ischial tuberosity and followed distally with the origin of the adductor magnus (Figure 11).

Anatomical cuts revealed the different anatomical structures. The tendinous origin of the SMB and LHBF had fibers in different directions. The SMB fibers had a vertical and transversal position, while the LHBF fibers were longitudinal. The inferior consecutive transverse anatomical cross-sections assumed the teardrop shape of the SMB muscle described in the dissection above. The distal cuts revealed that the diameter of the round and lateral portion decreased and became flattened distally, while the medial membranous portion of the SMB had a fascial connection with the adductor magnus and became wider and thinner (Figure 12).

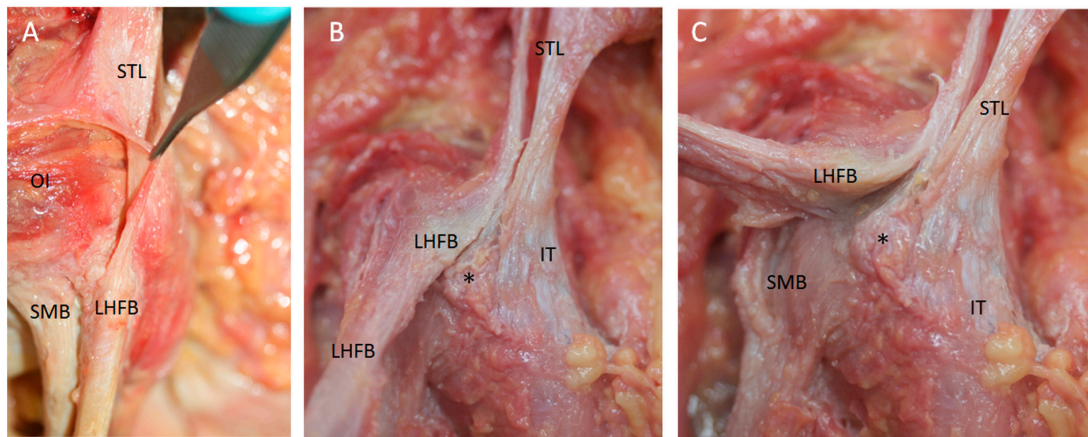


Figure 10. (A) The accurate dissection of the STL showing that the most superficial layer of the sacro-tuberous ligament (STL) is continuous with the long tendon of biceps femoris (LHBF) superficially on the right side. OI: Obturator internus. (B) STL inserted at the LHBF as and also has a insertion as a cord in the vertex (black *) of the ischial tuberosity and at the medial side of the ischial tuberosity (IT). (C) After moving medially the LHBF it is possible to observe all the origin extension of the tendon of semimembranosus muscle (SMB).

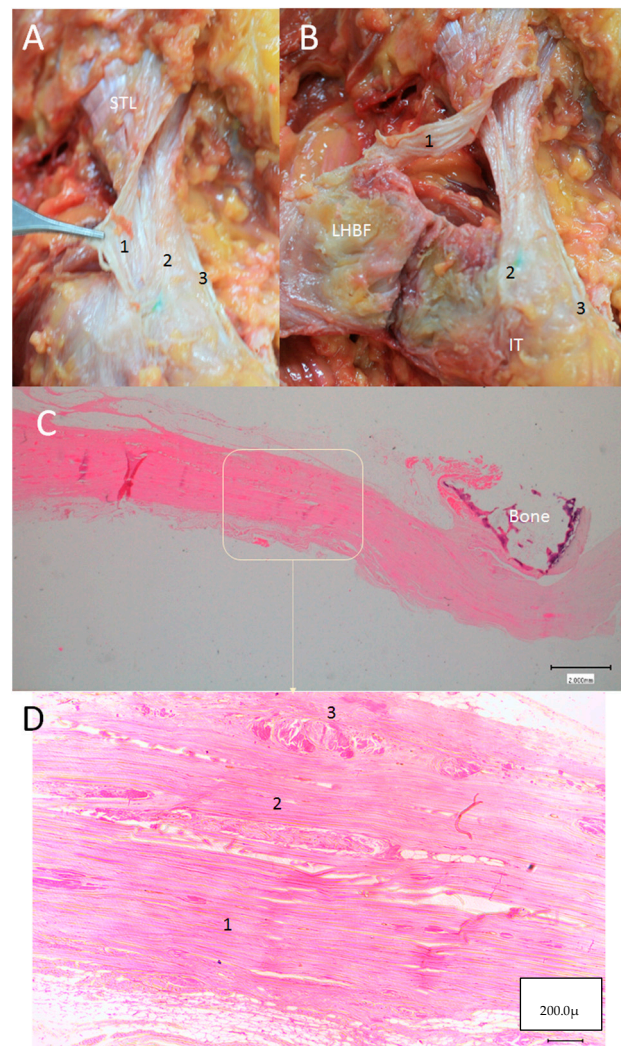


Figure 11. (A,B) The anatomical study showing different layers (1, 2, 3) of the sacrotuberous ligament (STL) that insert at different points on the right side. They have to be separated with a scalpel; however,

it is very evident in the difference between layers 1 and 2. Layer 1 follows with the superficial tendinous fibers of the tendon of the long head biceps femoris (LHBF). Layer 2 inserts at the vertex of the ischial tuberosity and layer 3 at the medial side of the ischial tuberosity. (C) Microscopical study showing the dense connective tissue of the STL, seen transversally, and its relationship with the sacrum bone. (D) A higher vision of the STL allowing us to see the three layers separated, in this case, by dense, less-organized connective tissue.

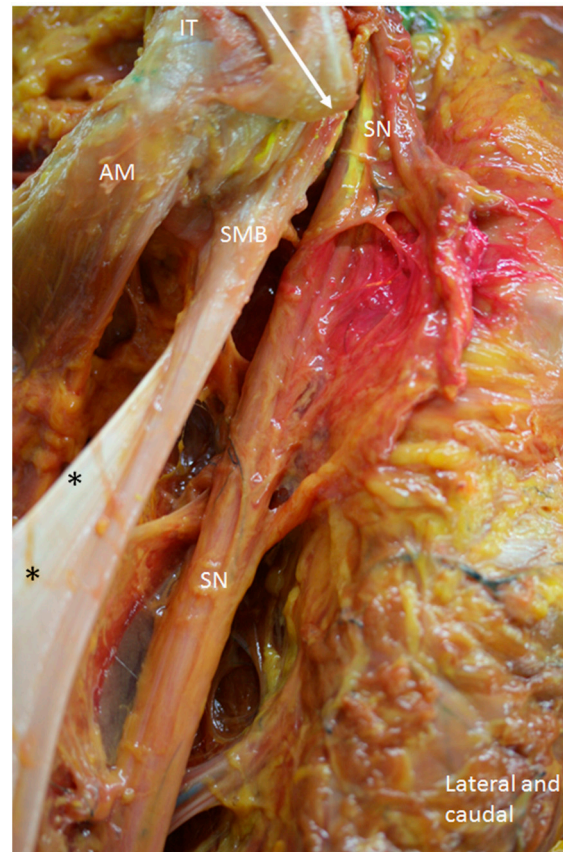


Figure 12. Anatomical view of the posterior and right side of the hip. The gluteus maximus muscle, the long head of the biceps femoris and the semitendinosus has been removed to observe the tendon of the semimembranosus muscle (SMB). It has a rounder shape at the more superior and lateral part (white arrow), which distally became thinner, and a thin membrane medially (black *) that originates at the lateral side of the ischial tuberosity (IT). AM: Adductor maximus muscles. The sciatic nerve (SN) at the lateral side has a close relationship with the SMB.

Finally, an important relationship, seen via ultrasound, was confirmed via dissection and transversal cuts, namely, the presence of a thinner layer of dense connective tissue that came from the origin of the SMB and LHBF and ran transversally to reach the gluteus maximus muscle (Figure 4A). This layer made a specific tunnel to the passageway of the sciatic and posterior cutaneous nerves and isolated them from other structures (Figure 4B).

The histological analysis revealed the presence of the three layers (Figure 11C,D) of the STL that were very close together but separated by adipose tissue, blood vessels or loose connective tissue. It was not possible to distinguish this ligament from the LHBF tendon, but it was possible to identify the different directions of the dense connective tissue fibers forming the tendons of the LHBF and SMB. The retinaculum (Figures 3B and 9C) and expansion (Figures 5 and 13) confirmed the dense connective tissue forming them, and their thicknesses were observed via ultrasound.

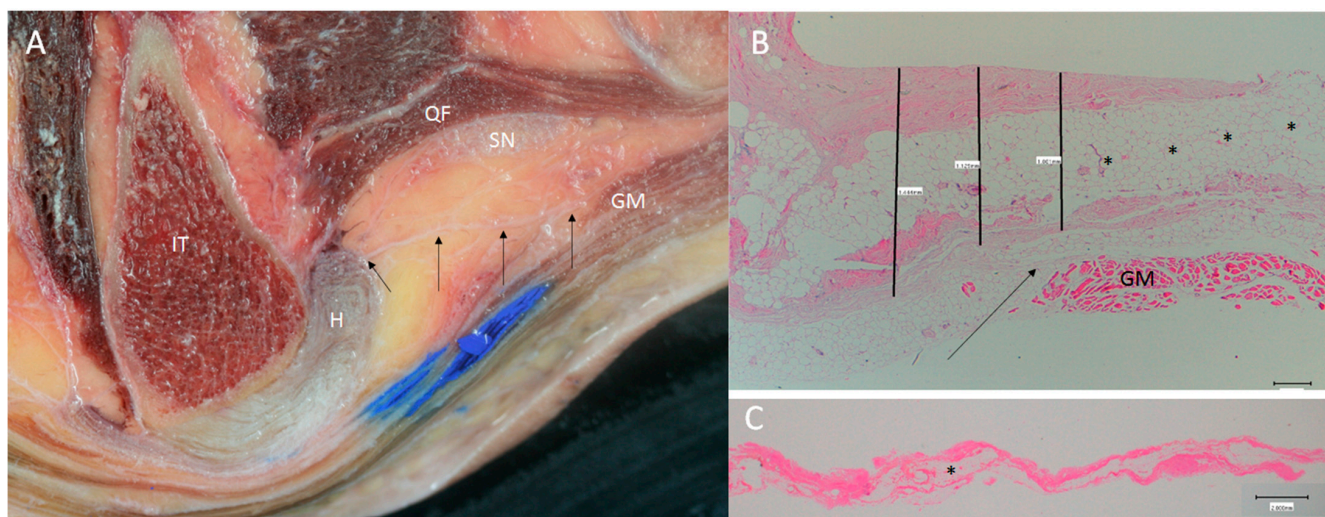


Figure 13. The expansion over the sciatic nerve (SN) (black arrows) was observed and measured: (A) anatomical view of the expansion going from the origin of the hamstrings (H) to the gluteus maximus muscle (GM) on the right side; (B) histological study allowing us to identify several thin and irregular layers of the dense connective tissue separated by adipose tissue (black *) (200.0 μ). (C) histological view of the expansion with similar morphology (2.000 mm).

4. Discussion

The present study demonstrates that the proximal attachment of the hamstring muscles is more complex than that described in the classical anatomy textbooks. An ultrasound study can identify all the structures that are in association with them. Previous anatomical research focused on studying the morphology, morphometry and composition of these muscles. However, before the present study, the analysis of the proximal attachment of these muscles and the visualization of the connections between the hamstring, the ST, the adductor magnus and the sciatic nerve using ultrasound, macroscopic and microscopic analysis had not been performed. This information could help in understanding the causes of injury, explain certain pathologies associated with hamstring injuries or help in diagnostic examinations and even in therapeutic applications.

Several studies in this area [19] have described the common tendon of the ST and LHBF as an oval structure that measures 2.7 ± 0.5 cm from proximal to distal and 1.8 ± 0.2 cm from medial to lateral [12,19]. Other studies have also focused on morphology but have added the footprint of the proximal attachment of these muscles [11]. The length of the common tendon (LHBF and ST) is between 9.1 and 10 cm [11,19] (Feucht et al., 2015; Miller et al., 2007). The results are always very similar regardless of whether they were analyzed using anatomical samples or living volunteers [20]. More recently, the proximal/distal area ratio and the internal structure of the hamstrings have also been explored [21]. Due to the important and precise morphometric details of previous studies, the present investigation focused more on the relationships or connections of the proximal attachment of the hamstring muscles for possible clinical implications.

Some studies have observed a musculotendinous junction of the LHBF-ST and have described a common tendon between the LHBF and ST (showing a pennation angle of 9.2 ± 1.5 degrees, with muscle cells from both muscles interposing with the tendinous tissue) as an intrinsic risk factor for hamstring injury [10]. However, our dissections also revealed a close tendinous relationship between the superior origin of the LHBF and the STL and the SMB that must also be present in possible pathologies of this area.

The relationship of the LHBF with the STL has been described as an anatomical and histological continuity [8,9]. Our results further confirm this continuity through ultrasound, anatomical and histological findings. Moreover, some studies have described a continuity of the STL with the ST [9], even via MR imaging [22]. However, we believe that the dense

connective tissue of the STL finishes with the origin of the LHBF, as described in other studies [8].

Unlike previous studies that have described the STL as consisting of two different layers without any muscular contributions [23], we observed that the STL can be formed of three layers, originating at the sacrum and presenting different attachments, as identified in the dissection and histological analysis. These different insertions could explain why some of the injuries of the hamstring muscles occur at the sacrum or even at the sacroiliac joint, which could be important for differential diagnoses. Moreover, one of the insertions is in association with the adductor magnus muscle origin, which could explain the important relationship between the pelvic position and lumbar biomechanics [24]. The present study would also suggest that the ischiocondylar portion of the adductor magnus muscle has a stabilizing function and a sizable tendon that can remain intact in proximal hamstring avulsions, as proposed by other studies [20,25]. This can also anatomically explain why there is an association between the adductor magnus muscle and hamstring pathology observed in clinical studies [26]. The connections of the attachment of the adductor magnus muscle and the SMB described in the present study would be a possible reason for the elevated incidence of hamstring injuries and also implies that injuries can occur at the adductor magnus muscle origin. These injuries account for 10% of all on-field injuries in team sports, with 13% of athletes sustaining a hamstring injury within 9 months, most commonly during competition [2]. Of all the hamstrings muscles, the one with the highest percentage of injuries is the LHBF [27]. This could be due to the LHBF presenting more fixation points. For example, in addition to being in continuation with the STL [8], the LHBF is fixed to the ischial tuberosity by a retinaculum [7], which was measured for the first time via ultrasound and histology in this study, and is also fixed, first with the SMB tendon and then with the ST tendon.

Injuries of the SMB muscle are the least common among the hamstring muscles [6,28,29] and are generally caused by hip elongation [30], which affects the cranial part of this muscle [6]. The present study describes the morphology of the SMB origin and would try to explain why it is less likely to become injured. Furthermore, its relationship with the adductor magnus could explain the injuries that occur with maximum hip extensions.

We did not analyze the expansions that the STL receive, but there is a difference in the attachment of the muscles of the superior part compared with that of the muscles of the inferior part that could explain certain pathologies. At the superior border of the ligament, some studies have described the convergence of the aponeurosis of the erector spinae muscles, the posterior wall of the para-spinal sheath (or posterior layer of the thoracolumbar fascia), and the gluteus maximus muscle before arrival at the STL [31]. At the inferior part, there are different points of anchoring on the ligament for the ST, the LHBF and adductor magnus. We postulate that this could be a stressful factor for the STL as it is composed of regular collagen that can hold maximal force in a limited number of planes, making it vulnerable to tensions or shear forces in different directions [32]. This could affect the LHBF given the connections between them.

Finally, some studies have used histology to observe the hamstring origin and the STL. Our findings are consistent with the results of other studies [9], revealing a distinct connection of the STL, LHBF and SMB on the ischia tuberosity, as well as an attachment of the STL to the LHBF, as described in some studies [8]. More studies are needed to define the level of collagen and elastin pathology, as well as the effects of this insertion in the STL on biomechanism.

The fascial structures covering the hamstrings and sciatic nerve were measured via ultrasound and histology for the first time in the present study; thus, we cannot compare these findings with those of other studies in the literature. The expansion covering the sciatic and posterior femoral cutaneous nerves is very thin, and its observations coincide with those of previous anatomical studies [7]. We would like to highlight that this fascial structure could be used for a sciatic nerve block, which has been described for other areas and other nerves [33–36], with lower risk of nerve damage. However, the fibrosis of

these fascial expansions can be observed in hamstring syndrome and could cause nerve compression at this level [37]. Thus, regarding the clinical importance of this fascial expansion, the ultrasound study of this structure could be fundamental in the treatment of the neuropathies of these nerves.

The present study shares the limitations of other anatomical studies. First, it is a descriptive study that evaluated specimens with an advanced age. However, there is no evidence to suggest that muscle morphology and relationships change with age. Another limitation is that the functional role of these connections could not be analyzed with the specimens.

5. Conclusions

In conclusion, the proximal attachment of the hamstring muscles is more complex than classically described, and ultrasound is a valid tool with which to analyze anatomical structures. They are closely associated with the adductor magnus and the sacrotuberous ligament and important to clinical diagnosis.

Author Contributions: Conceptualization, M.M.-P. and A.P.-B.; methodology, P.I.-C., M.M.-P. and A.P.-B.; software P.I.-C. and J.-C.O.-S.; validation, M.M.-P., A.P.-B., P.I.-C., I.M. and C.M.; formal analysis, P.I.-C., J.-C.O.-S. and M.M.-P.; statistical study, J.-C.O.-S. and S.O.-M.; investigation, M.M.-P., P.I.-C., J.A., S.O.-M., J.B. and J.A.; writing—original draft preparation, A.P.-B., P.I.-C. and M.M.-P.; writing—review and editing, M.M.-P., I.M., A.P.-B., S.O.-M., J.-C.O.-S., J.A. and C.M.; supervision, A.P.-B., M.M.-P. and I.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: This study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki and was approved by the Ethics Committee of Universitat de Barcelona (00003099, 28 February 2022).

Informed Consent Statement: All the donators gave their informed consent to participate in this study, to have their results published and for the use of their bodies for investigation and teaching at the university.

Data Availability Statement: The datasets used in this work can be accessed upon request.

Acknowledgments: To all the donators for their generosity and altruism. They help us to investigate and teach and specially to learn the human anatomy.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Williams, M.A.; Naffaa, L. Ischial Tuberosity Avulsion Fracture Mimicking Calcified Mass on Plain Films: A Case Report. *Cureus* **2024**, *16*, e53165. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Maniar, N.; Carmichael, D.S.; Hickey, J.T.; Timmins, R.G.; San Jose, A.J.; Dickson, J.; Opar, D. Incidence and prevalence of hamstring injuries in field-based team sports: A systematic review and meta-analysis of 5952 injuries from over 7 million exposure hours. *Br. J. Sports Med.* **2023**, *57*, 109–116. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Sheean, A.J.; Arner, J.W.; Bradley, J.P. Proximal Hamstring Tendon Injuries: Diagnosis and Management. *Arthroscopy* **2021**, *37*, 435–437. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Fletcher, A.N.; Cheah, J.W.; Nho, S.J.; Mather, R.C. Proximal Hamstring Injuries. *Clin. Sports Med.* **2021**, *40*, 339–361. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
5. Ekstrand, J.; Hägglund, M.; Waldén, M. Epidemiology of muscle injuries in professional football (soccer). *Am. J. Sports Med.* **2011**, *39*, 1226–1232. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Askling, C.M.; Tengvar, M.; Saartok, T.; Thorstensson, A. Acute first-time hamstring strains during slow-speed stretching: Clinical, magnetic resonance imaging, and recovery characteristics. *Am. J. Sports Med.* **2007**, *35*, 1716–1724. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
7. Pérez-Bellmunt, A.; Miguel-Pérez, M.; Brugué, M.B.; Cabús, J.B.; Casals, M.; Martinoli, C.; Kuisma, R. An anatomical and histological study of the structures surrounding the proximal attachment of the hamstring muscles. *Man. Ther.* **2015**, *20*, 445–450. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
8. Sato, K.; Nimura, A.; Yamaguchi, K.; Akita, K. Anatomical study of the proximal origin of hamstring muscles. *J. Orthop. Sci.* **2012**, *17*, 614–618. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

9. Kim, M.; Yang, H.M.; Yeo, I.S. Anatomical study of the sacrotuberous ligament and the hamstring muscles: A histomorphological analysis. *Clin. Anat.* **2023**, *37*, 383–389. [[CrossRef](#)]
10. Farfán, E.; Rojas, S.; Olivé-Vilás, R.; Rodríguez-Baeza, A. Morphological study on the origin of the semitendinosus muscle in the long head of biceps femoris. *Scand. J. Med. Sci. Sports* **2021**, *31*, 2282–2290. [[CrossRef](#)]
11. Feucht, M.J.; Plath, J.E.; Seppel, G.; Hinterwimmer, S.; Imhoff, A.B.; Brucker, P.U. Gross anatomical and dimensional characteristics of the proximal hamstring origin. *Knee Surgery Sports Traumatol. Arthrosc.* **2014**, *23*, 2576–2582. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
12. Miller, S.L.; Webb, G.R. The proximal origin of the hamstrings and surrounding anatomy encountered during repair. *J. Bone Jt. Surg.* **2008**, *90* (Suppl. S2), 108–116. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
13. Neuschwander, T.B.; Benke, M.T.; Gerhardt, M.B. Anatomic Description of the Origin of the Proximal Hamstring. *Arthroscopy* **2015**, *31*, 1518–1521. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
14. Beltran, L.; Ghazikhanian, V.; Padron, M.; Beltran, J. The proximal hamstring muscle-tendon-bone unit: A review of the normal anatomy, biomechanics, and pathophysiology. *Eur. J. Radiol.* **2012**, *81*, 3772–3779. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
15. Cornelson, S.M.; Ruff, A.N.; Wells, C.; Sclocco, R.; Kettner, N.W. Sonographic measures and sensory threshold of the normal sciatic nerve and hamstring muscles. *J. Ultrasound* **2022**, *25*, 47–57. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Hjaltadóttir, A.P.; Hafsteinsson, D.; Árnason, Á.; Briem, K. Musculoskeletal ultrasound imaging of proximal and distal hamstrings cross sectional area in individuals with history of anterior cruciate ligament reconstruction. *Physiother. Theory Pract.* **2022**, *40*, 487–493. [[CrossRef](#)]
17. Balius, R.; Pedret, C.; Iriarte, I.; Sáiz, R.; Cerezal, L. Sonographic landmarks in hamstring muscles. In *Skeletal Radiology*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2019; Volume 48, pp. 1675–1683.
18. Beggs, I.; Stefano Bianchi, U.; Angel Bueno, S.; Michel Cohen, S.; Michel Court-Payen, F.; Andrew Grainger, D.; Kainberger, F.; Klauser, A.; Martinoli, C.; McNally, E.; et al. *Musculoskeletal Ultrasound Technical Guidelines IV. Hip*; European Society of MusculoSkeletal Radiology: Vienna, Austria, 2016.
19. Miller, S.L.; Gill, J.; Webb, G.R. The proximal origin of the hamstrings and surrounding anatomy encountered during repair: A cadaveric study. *J. Bone Jt. Surg.* **2007**, *89*, 44–48. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
20. Obey, M.R.; Broski, S.M.; Spinner, R.J.; Collins, M.S.; Krych, A.J. Anatomy of the Adductor Magnus Origin: Implications for Proximal Hamstring Injuries. *Orthop. J. Sports Med.* **2016**, *4*, 2325967115625055. [[CrossRef](#)]
21. Takeda, K.; Kato, K.; Ichimura, K.; Sakai, T. Unique morphological architecture of the hamstring muscles and its functional relevance revealed by analysis of isolated muscle specimens and quantification of structural parameters. *J. Anat.* **2023**, *243*, 284–296. [[CrossRef](#)]
22. Bierry, G.; Simeone, F.J.; Borg-Stein, J.P.; Clavert, P.; Palmer, W.E. Sacrotuberous ligament: Relationship to normal, torn, and retracted hamstring tendons on MR images. *Radiology* **2014**, *271*, 162–171. [[CrossRef](#)]
23. Hammer, N.; Höch, A.; Klima, S.; Le Joncour, J.B.; Rouquette, C.; Ramezani, M. Effects of Cutting the Sacrospinous and Sacrotuberous Ligaments. *Clin. Anat.* **2019**, *32*, 231–237. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Frey, M.; Poynter, A.; Younge, K.; De Carvalho, D. The relationship between lumbopelvic flexibility and sitting posture in adult women. *J. Biomech.* **2019**, *84*, 204–210. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
25. Broski, S.M.; Murthy, N.S.; Krych, A.J.; Obey, M.R.; Collins, M.S. The adductor magnus “mini-hamstring”: MRI appearance and potential pitfalls. *Skelet. Radiol.* **2016**, *45*, 213–219. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Jenö, S.H.; Launico, M.V.; Schindler, G.S. *Anatomy, Bony Pelvis and Lower Limb: Thigh Adductor Magnus Muscle*; StatPearls: Treasure Island, FL, USA, 2018.
27. Woods, C.; Hawkins, R.D.; Maltby, S.; Hulse, M.; Thomas, A.; Hodson, A. The Football Association Medical Research Programme: An audit of injuries in professional football—analysis of hamstring injuries. *Br. J. Sports Med.* **2004**, *38*, 36–41. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
28. Koulouris, G.; Connell, D. Hamstring Muscle Complex: An Imaging Review. *RadioGraphics* **2005**, *25*, 571–586. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
29. De Smet, A.A.; Best, T.M. MR imaging of the distribution and location of acute hamstring injuries in athletes. *Am. J. Roentgenol.* **2000**, *174*, 393–399. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
30. Askling, C.M.; Tengvar, M.; Saartok, T.; Thorstensson, A. Proximal hamstring strains of stretching type in different sports: Injury situations, clinical and magnetic resonance imaging characteristics, and return to sport. *Am. J. Sports Med.* **2008**, *36*, 1799–1804. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
31. Vleeming, A.; Schuenke, M.D.; Danneels, L.; Willard, F.H. The functional coupling of the deep abdominal and paraspinal muscles: The effects of simulated paraspinal muscle contraction on force transfer to the middle and posterior layer of the thoracolumbar fascia. *J. Anat.* **2014**, *225*, 447–462. [[CrossRef](#)]
32. Willard, F.H.; Vleeming, A.; Schuenke, M.D.; Danneels, L.; Schleip, R. The thoracolumbar fascia: Anatomy, function and clinical considerations. *J. Anat.* **2012**, *221*, 507–536. [[CrossRef](#)]
33. Míguez-Fernández, M.; Miguel-Pérez, M.; Ortiz-Sagrístà, J.C.; Pérez-Bellmunt, A.; Blasi-Cabus, J.; Möller, I.; Martinoli, C. Ultrasound and Anatomical Study of Accessing the Nerves in the Knee by Fascial Planes. *Pain Pract.* **2020**, *20*, 138–146. [[CrossRef](#)]
34. Machi, A.; Joshi, G.P. Interfascial plane blocks. *Best Pract. Res. Clin. Anaesthesiol.* **2019**, *33*, 303–315. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Elsharkawy, H.; Pawa, A.; Mariano, E.R. Interfascial Plane Blocks: Back to Basics. *Reg. Anesth. Pain Med.* **2018**, *43*, 341–346. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

36. Domingo, T.; Blasi, J.; Casals, M.; Mayoral, V.; Ortiz-Sagristá, J.C.; Miguel-Pérez, M. Is interfascial block with ultrasound-guided puncture useful in treatment of myofascial pain of the trapezius muscle? *Clin. J. Pain* **2011**, *27*, 297–303. [[CrossRef](#)]
37. Park, J.W.; Lee, Y.K.; Le, Y.L.; Shin, S.; Kang, Y.; Ko, K.H. Deep gluteal syndrome as a cause of posterior hip pain and sciatica-like pain. *Bone Jt. J.* **2020**, *102*, 556–567. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

4.2 Artículo 2

Resumen del artículo 2

Título:

What is new about the semimembranosus distal tendon? Ultrasound, anatomical, and histological study with clinical and therapeutic application.

Antecedentes del tema:

El músculo semimembranoso forma parte del grupo de los músculos isquiosurales y, aunque ya ha sido estudiado anatómicamente, la descripción de sus inserciones distales, conocida como pata de ganso profunda, es aún controvertida y genera debate. En relación a este músculo y sus inserciones, hay descritas múltiples patologías y se ha constatado que la ecografía es un método válido de estudio para su diagnóstico y manejo. Sin embargo, para la correcta interpretación de las imágenes se precisa un buen conocimiento anatómico de las estructuras implicadas y de las relaciones anatómicas y funcionales que se establecen entre ellas.

Hipótesis: El exhaustivo conocimiento anatómico e histológico del músculo semimembranoso y de sus inserciones distales, facilitaría su identificación e interpretación ecográfica para el posible diagnóstico de lesiones a través de la imagen.

Objetivos: Estudiar ecográfica, anatómica e histológicamente el músculo semimembranoso, con especial detenimiento en sus inserciones distales.

Metodología:

Se realizó un estudio observacional descriptivo en 38 rodillas no pareadas de muestras anatómicas de adultos y en 4 rodillas no pareadas de fetos de 29 a 38 semanas de edad, todas ellas criopreservadas a -20°C y provenientes de cadáveres donantes de la Sala de Disección de la Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud, campus de Bellvitge, de la Universitat de Barcelona. Después de inyectar las arterias con látex (LatexCompound), se realizó primero el estudio ecográfico, seguido del anatómico y, en algunos especímenes seleccionados de manera aleatoria, se tomaron muestras histológicas. El orden de numeración de las extremidades ha sido progresivo a medida que se han ido estudiando. A nivel estadístico se estudiaron las variables de

edad y sexo de los especímenes, la lateralidad de las extremidades estudiadas y los datos recogidos en diferentes puntos referentes a la anchura, grosor y diámetro del músculo semimembranoso y de las porciones tendinosas más significativas clínicamente. Las mediciones del músculo se tomaron a 10 cm del epicóndilo medial y justo antes de la división del tendón distal del músculo semimembranoso.

Resultados:

El estudio reveló que la exploración ecográfica permite identificar las diferentes porciones tendinosas de la inserción distal del músculo semimembranoso, así como la rotación del músculo y del tendón, de medial a posterior. El estudio anatómico confirmó esta rotación y reveló una anchura, grosor y diámetro promedio de 38,29 mm, 14,36 mm y 112,64 mm, respectivamente. Se observaron relaciones importantes entre las divisiones de los tendones principales y el ligamento colateral medial, la cápsula posterior de la rodilla y el músculo poplíteo.

Los resultados del estudio estadístico no revelaron diferencias estadísticamente significativas en lo que respecta a las medidas obtenidas del músculo respecto a la edad y sexo de los especímenes, ni a la lateralidad de las extremidades estudiadas.

Conclusiones:

El estudio ecográfico permite identificar correctamente las porciones tendinosas distales del músculo semimembranoso y el estudio anatómico demuestra que la disposición de su porción capsular tiene una implicación directa en lesiones de rodilla, por lo que los resultados obtenidos pueden ayudar a explicar algunas patologías de la rodilla y de la inserción distal del músculo semimembranoso, así como a mejorar los protocolos de rehabilitación postquirúrgica de algunas lesiones meniscales.

Article

What Is New about the Semimembranosus Distal Tendon? Ultrasound, Anatomical, and Histological Study with Clinical and Therapeutic Application

Pere Iglesias-Chamorro ¹, Albert Pérez-Bellmunt ^{2,3} , Sara Ortiz-Miguel ^{2,3,4}, Ingrid Möller ¹, Juan Blasi ⁵, Juan Ortiz-Sagristà ⁶, Carlo Martinoli ⁷, Xavier Sanjuan ⁸  and Maribel Miguel-Pérez ^{1,*} 

- ¹ Unit of Human Anatomy and Embryology, Department of Pathology and Experimental Therapeutics, Faculty of Medicine and Health Sciences (Bellvitge Campus), University of Barcelona, L'Hospitalet de Llobregat, 08907 Barcelona, Spain; centretars@centretars.com (P.I.-C.); ingridmoller@ub.edu (I.M.)
- ² Basic Sciences Department, Universitat Internacional de Catalunya, Sant Cugat del Vallès, 08190 Barcelona, Spain; aperez@uic.cat (A.P.-B.); sara.mortiz@ub.edu (S.O.-M.)
- ³ ACTIUM Functional Anatomy Group, Sant Cugat del Vallès, 08190 Barcelona, Spain
- ⁴ Unit of Human Anatomy and Embryology, Department of Surgery and Medical-Surgical Specialities, Faculty of Medicine and Health Sciences (Clinic Campus), University of Barcelona, 08036 Barcelona, Spain
- ⁵ Unity of Histology, Department of Pathology and Experimental Therapeutics, Faculty of Medicine and Health Sciences (Bellvitge Campus), University of Barcelona, 08907 Barcelona, Spain; blasi@ub.edu
- ⁶ Anesthesia Department, Fundació Puigvert, 08025 Barcelona, Spain; siometge@gmail.com
- ⁷ Department of Health Sciences, Università di Genova, Via Antonio Pastore 1, 16132 Genova, Italy; carlo.martinoli@unige.it
- ⁸ Unit of Pathological Anatomy, Department of Pathology and Experimental Therapeutics, Faculty of Medicine and Health Sciences (Bellvitge Campus), University of Barcelona, 08907 Barcelona, Spain; xsanjuang@ub.edu
- * Correspondence: mimiguel@ub.edu; Tel.: +34-93-4020170



Citation: Iglesias-Chamorro, P.; Pérez-Bellmunt, A.; Ortiz-Miguel, S.; Möller, I.; Blasi, J.; Ortiz-Sagristà, J.; Martinoli, C.; Sanjuan, X.; Miguel-Pérez, M. What Is New about the Semimembranosus Distal Tendon? Ultrasound, Anatomical, and Histological Study with Clinical and Therapeutic Application. *Life* **2024**, *14*, 631. <https://doi.org/10.3390/life14050631>

Academic Editor: Michael L. Pretterklieber

Received: 17 April 2024

Revised: 9 May 2024

Accepted: 13 May 2024

Published: 15 May 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: The semimembranosus muscle inserts into several tendons that are associated with some pathologies. Although ultrasound is useful for studying, diagnosing, and managing these pathologies, the correct interpretation of any images requires a clear knowledge of the related anatomical structures and the inter-related functions. We studied 38 cryopreserved non-paired knees from adult anatomical specimens and 4 non-paired knees from 29 to 38-week-old fetuses. The semimembranosus muscle and its tendons were located, observed, and injected under ultrasound guidance. The macroscopic anatomy was studied using dissection and anatomical cuts and the tendons were analyzed histologically. Measurements of muscle were taken 10 cm from the medial epicondyle and just before the tendon divided. The ultrasound facilitated the identification of the different divisions of the tendon of semimembranosus muscle and the rotation of the muscle and tendon from medial to posterior. An anatomical study confirmed this rotation and revealed an average width, thickness, and diameter of 38.29 mm, 14.36 mm, and 112.64 mm, respectively. Important relationships were observed between the divisions of the main tendons and the medial collateral ligament, the posterior side of the knee and popliteus muscle. This information can help to explain knee pathologies and facilitate rehabilitation after surgery.

Keywords: semimembranosus tendon division; ultrasound; anatomical and histological study; rotation; knee joint; meniscus

1. Introduction

The pes anserinus is formed by the insertions of the sartorius muscle, the gracilis muscle, and the semitendinosus muscle at the medial side of the knee [1–3]. This lies superficial to the insertion of the distal tendon of the semimembranosus muscle (SMBM), which inserts as several tendons to form the deep pes anserinus [1]. There are three tendons in this distal attachment: the direct tendon (DT), the anterior or reflect tendons (AT), and the recurrent tendon (RT), which is also known as oblique popliteal ligament (OPL) [1].

These distal tendons insert in different anatomical structures [4–12] and have different histological [12,13] and embryological [14,15] characteristics affording them different roles in the stabilization [4,9,11,16–18] and proprioception [5,13,19] of the knee joint. However, each tendon will respond differently to traction force, which can produce differing repercussions [7,20,21], including avulsion [20,22], tendinopathy [21], bursitis [14,23], meniscal injury [7,22,24], and capsule tear [20,22].

Magnetic resonance imaging is typically preferred for identifying the tendon, its insertions, and any pathology [4,6,25,26], but ultrasound is also considered a good tool [16,17,21,27], especially for specific injuries of the distal semimembranosus muscle [17,21].

The utility of ultrasound in this setting requires detailed anatomical knowledge of the muscular fibers of the semimembranosus muscle in relation to the distal tendon and the insertions of that muscle. Improved knowledge will help clinicians to better understand these ultrasound images, posteromedial knee injuries, and post-surgery rehabilitation.

2. Materials and Methods

2.1. Study Design and Samples

This observational study involved the ultrasound, anatomical, and histological examination of 38 knees (18 left and 20 right) obtained from the donors of 18 women (47.37%) and 20 men (52.63%), ranging in age from 61 to 92 years old. In addition, four limbs were obtained from fetuses aged 29–38 weeks old for embryology study.

All limbs had been cryopreserved at -20°C in the dissection room. The body donor program of the Faculty of Medicine and Health Sciences (Bellvitge Campus) provided all of the specimens. None of the anatomical samples had evidence of traumatic injury or surgical scars. Samples that presented interventions, prostheses, or surgical material were excluded. The study was approved by the local ethics committee (IRB00003099).

Before the study, we injected the femoral artery with black latex (Latex Compound Española S.A., Sabadell, Spain) to facilitate its localization in the ultrasound and anatomical studies. The study then proceeded, in order, through ultrasound, anatomical, and histological examination.

2.2. Ultrasound Study

Ultrasound was performed with the LOGIQ P9 ultrasound system (GE Ultrasound Korea LTD, Seongnam, Korea) using a high-frequency linear probe (6–15 MHz). The posterior thigh muscles were identified in the transverse and longitudinal axis before examination. The semimembranosus muscle was then visualized 20 cm before it formed the main tendon and was followed distally until the tendon divided on the DT, AT, and RT.

To corroborate and verify the ultrasound images of the AT, RT with posterior dissection study, an ultrasound-guided injection was made. An ultrasound-guided injection of 2 mL of green, red, or blue dye (Tempera mate arts Titan, Manufactures Titan arts SLU, Sant Fruitós del Bages, Barcelona, Spain) and 1.5 mL of saline with a 20-gage needle was performed at the short axis of the lower extremity to obtain a longitudinal image of the RT or oblique popliteal ligament and at the long axis of the medial side of the knee to visualize the medial collateral ligament. This helped to find the insertion point of the AT and DT at the medial tibial condyle inferior to the medial meniscus.

2.3. Anatomical Study

Anatomical samples were analyzed macroscopically by dissections and anatomical sections after the ultrasound study.

2.3.1. Dissection Procedure

The gross anatomical study was performed by dissecting 34 limbs to observe the injected dye and any anatomical relationships between structures. The dissection was performed using a classical method along the planes of division in the skin, subcutaneous tissue, or adipose tissue to expose the muscular fascia, fascia lata, and crural fascia of the

anterior compartment. First, we made a longitudinal lateral incision in the posterior side and two horizontal incisions 40 cm superior and inferior to the knee. The anterior side was dissected in the same way.

The muscular fasciae were then cut; the sartorius, gracilis, and semitendinosus muscles were identified and removed from proximal to distal; the semimembranosus muscle was identified, and the different tendons and attachments were identified. When dissecting the semimembranosus muscle and its tendon we carried out a manual traction of the main tendon. The location of the dye was studied to confirm the correct injection.

Anthropometric measurements of the width, thickness, and diameter of the semimembranosus muscle were taken with a digital caliper (Mytutoyo ABSOLUTE Solar Caliper Series 500 with ABSOLUTE technology, Coral Spring, FL (USA)) at 10 cm from the medial condyle of the femur and its distal tendon, before the division in the DT, AT, and RT. At each step, images were taken to record our findings (Canon EOS 60D, Ota, Tokyo (Japan)).

The eight fetal knees were dissected using the same technique.

2.3.2. Sectional Study

A sectional anatomic study was undertaken in six limbs by performing transverse cuts from above the patella to below the tibial tuberosity.

2.4. Histological Study

In 5 randomly chosen specimens, we collected samples of comparable size (2 cm × 2 cm) from the AT, DT, and RT. The samples were fixed in 4% formaldehyde processed into paraffin blocks and cut into 4-µm sections before being dyed with a hematoxylin-eosin stain. Fascial thicknesses were measured with a Leica Digital Microimaging Device (Leica DMD108 microscope, Leica Microsystems, Wetzlar, Germany).

2.5. Statistical Analysis

Statistical analysis was performed on all the data obtained for the control variables (i.e., sex, limb side, and age) and the anthropometric variables. The qualitative variables are presented as absolute and relative frequency; quantitative variables are in the median and interquartile range (IQR) and mean with standard deviation. The Shapiro–Wilk test is used to study the existence of normal distribution in quantitative variables. The relationship between categorical and quantitative variables is carried out through Student's *t*-test (normal distribution) or Mann–Whitney U-test (non-normal). The relationship between the quantitative variables is carried out through the Pearson (normal distribution) or Spearman (non-normal) correlation coefficient.

3. Results

3.1. Ultrasound Study

Ultrasound always identified the semimembranosus muscle in the posterior thigh compartment, as an oval or round hypoechogenic structure, with the probe at the short axis, formed by different fascicles with an hyperechogenic line seen in the middle of the muscle (Figure 1A,B).

When the probe followed the muscle inferiorly, a hyperechogenic line appeared at the medial and posterior border of the muscle. This increased distally and followed as a part of the distal tendon. Following the course of the muscle and tendon inferiorly, we observed that this border and muscle rotated from medial to posterior: the medial side of the muscle, with this hyperechogenic border became posterior by the inferior part of the tendon and gave rise to the AT and DT when the tendon divided. The anterior side of the muscle followed the anterior side of the tendon and became lateral and posterior, giving rise to the RT (or oblique popliteal ligament OPL) (Figure 1A–E).

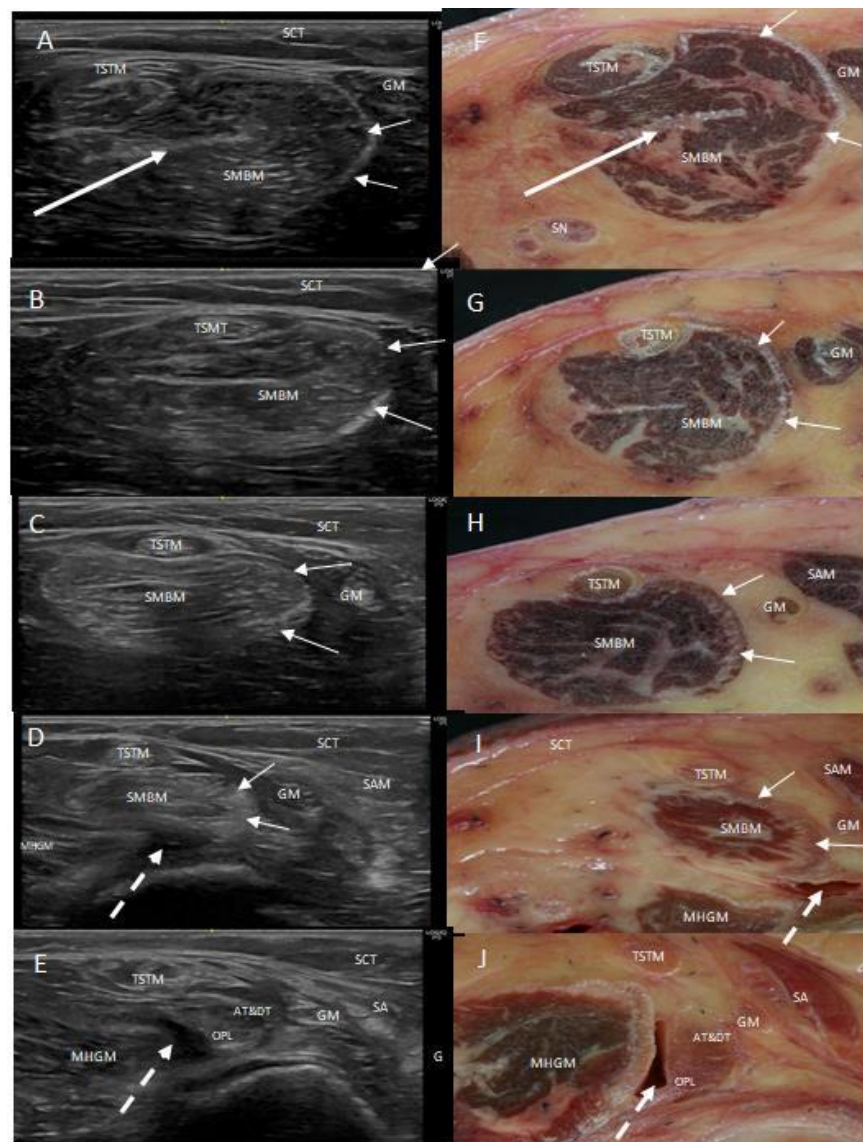


Figure 1. Consecutive ultrasound images (A–E) and transversal anatomical sections (F–J) of the posteromedial side of the left thigh. The semimembranosus muscle (SMBM) is visible. The long white arrow shows the intraponeurosis inside the muscle and the short white arrows places the medial aponeurosis that increases from superior to inferior until it arrives to the main tendon and forms the anterior (AT) and direct (DT) tendons of the semimembranosus muscle from the medial to the posterior part of the knee. The oblique popliteal ligament (OPL) comes from the muscle, and it is located at the lateral side. The tendon of the semitendinosus muscle (TSTM) is always in relation to the SMBM. In pictures (D,E,I,J), the white discontinued arrow shows the bursa situated between the oblique popliteal ligament and the medial head of the gastrocnemius muscle.

After division, we observed the AT and DT at the long axis as the hyperechogenic structures went to the medial side of the knee. They appeared as round hyperechogenic or hypoechogenic structures, depending on the probe ultrasound position and were covered by the medial collateral ligament that surrounded them and formed a tunnel through which they passed (Figure 2A,B).

With the probe in the short axis, the oblique popliteal ligament was observed and located as a long hyperechogenic structure with parallel fibers in close relation to the posterior capsule of the knee, anterior to the medial head of the gastrocnemius muscle (Figure 3A).

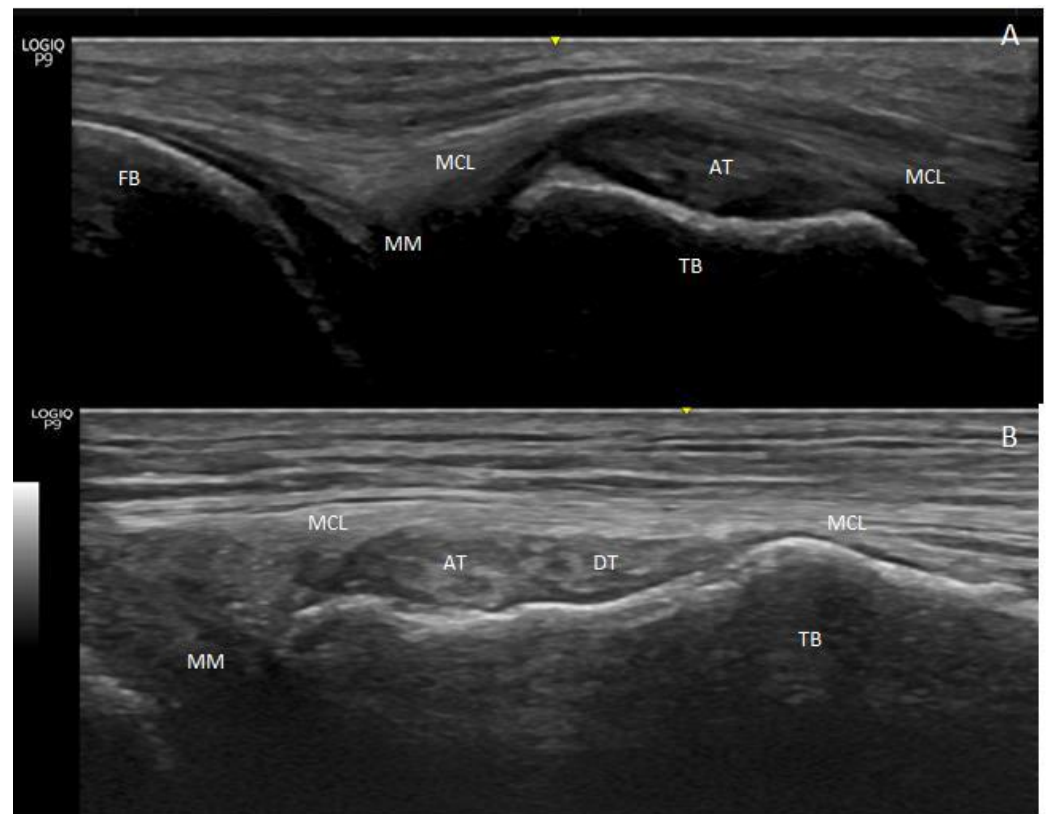


Figure 2. Image of the medial side of the knee. (A) An ultrasound image with the probe at the long axis: the anterior tendon (AT) of the semimembranosus muscle is seen as a round hyperechogenic image covered by the medial collateral ligament (MCL) in a special concavity that the tibia bone (TB) forms at the point of insertion. (B) Ultrasound vision of the two round hyperechogenic structures compatibles with the anterior tendon (AT) and direct tendon (DT) of the semimembranosus. Medial meniscus—(MM) and femur bone—(FB).

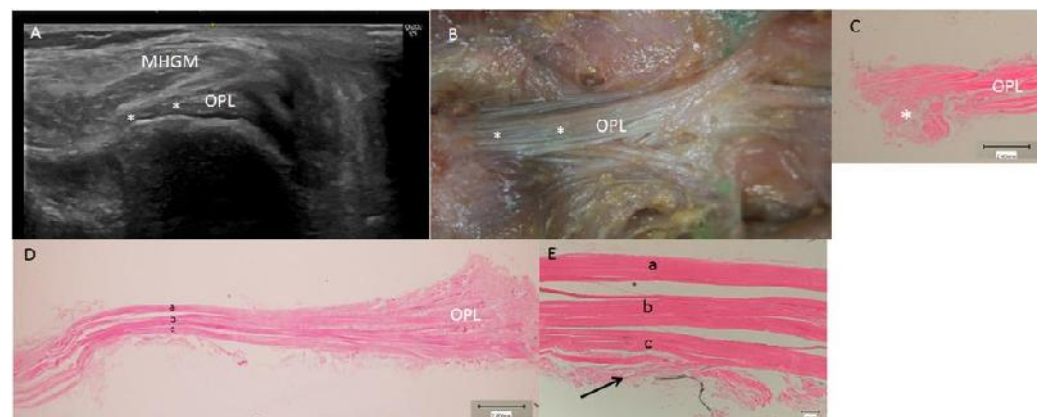


Figure 3. Left oblique popliteal ligament (OPL): (A) An ultrasound view at the short axis. The ligament, covered by the medial head of the gastrocnemius muscle (MHGM), inserts posterolateral at the capsule of the knee (*). (B) Posterior anatomic view of the left oblique popliteal ligament (OPL) and its insertion at the capsule (*). (C) Transversal histologic view of the OPL at the insertion of the capsule (*). (D) Transversal histologic view of the OPL. It is possible to visualize several layers of the dense connective tissue (a, b, c) separated by a less connective tissue. (E) Magnified vision of the OPL with the three layers (a, b, c) and the deep relation with the capsule of the knee (black arrow).

Lateral to the main semimembranosus tendon, between the main semimembranosus tendon and the medial head of the gastrocnemius muscle, all knees revealed a comma-shape hypoechogenic image compatible with a bursa. The presence of a medial hyperechogenic border was a characteristic finding of the medial head of the gastrocnemius muscle (Figures 1D,E and 4A).

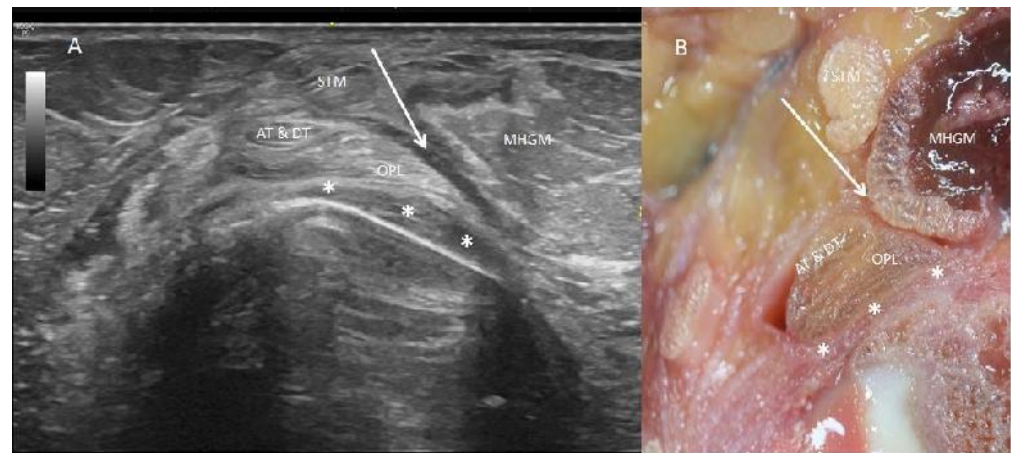


Figure 4. Posterior side of the right knee. (A) An ultrasound vision with the probe at the short axis that shows the division of the semimembranosus tendon and the rotation of it. The oblique popliteal ligament (OPL) is seen as a long hyperechogenic structure with parallel fibers in close relation to the posterior capsule of the knee (white *) in a lateral position. The anterior and direct tendon (AT and DT) are in the posterior side. Between these different tendons and the medial head of the gastrocnemius muscle (MHGM) there is the bursa (white arrow). (B) A transversal anatomic section of the knee that shows these different structures. Semitendinosus tendon—(STM).

3.2. Anatomical Study

The anatomical study of the knees revealed that the semimembranosus muscle arrived at the medial knee covered by the pes anserinus. After removing each of the tendons that formed the pes anserinus, from proximal to distal, all the knees had lax and dense connective tissue expansions between the pes anserinus and semimembranosus tendons (Figure 5).

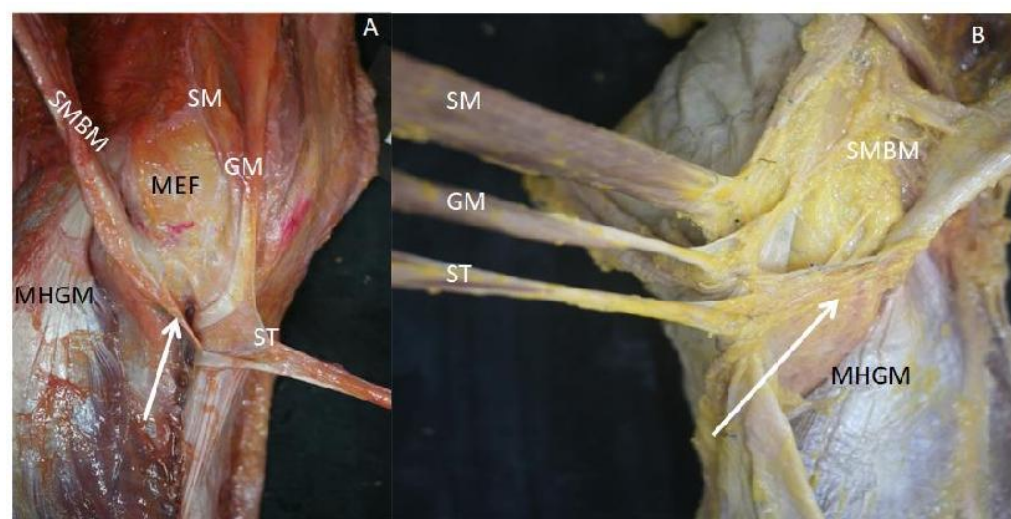


Figure 5. Two posterior and medial vision of a (A) left knee and (B) right knee. The loose and dense connective tissue expansions (white arrow) go from the pes anserinus (sartorius muscle (SM), gracilis (GM), semitendinosus (ST)) to the tendon of the semimembranosus muscle (SMBM). Medial epicondyle of the femur—(MEF); medial head of the gastrocnemius muscle—(MHGM).

The tendon was also surrounded by connective tissue expansions from the vastus medialis muscle, the fascia lata, the retinaculum, the adductor maximus muscle, the medial collateral ligament, the medial epicondyle, the medial head of the gastrocnemius muscle and popliteus muscle and forming a tunnel for the central tendon that merged with it superiorly. It was necessary to cut this tissue to observe the main tendon (Figure 6).

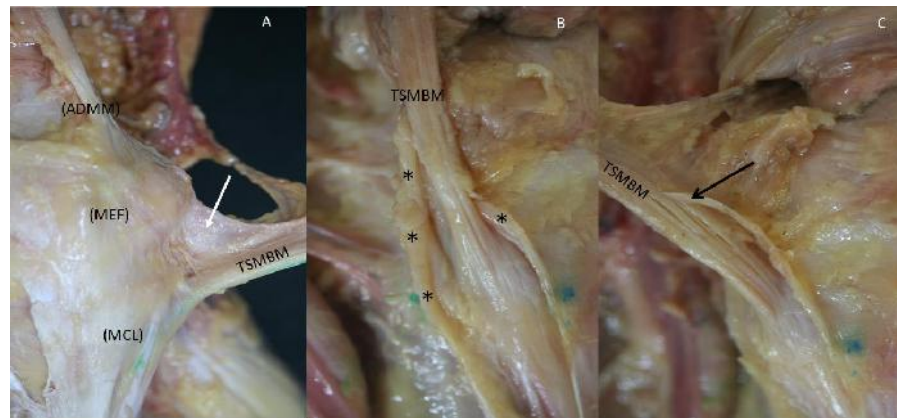


Figure 6. Different visions of the distal tendon of the right semimembranosus tendon (TSMBM) (A) Anteromedial vision. Dense connective expansion (white arrow) arrives from the medial collateral ligament (MCL), the medial epicondyle of the femur bone (MEF) and the adductor maximus muscle (ADMM) (B) Medial vision. The different expansions (black *) form a tunnel for the TSMBM that merged with it superiorly and it is necessary to cut it to visualize the tendon. (C) Posteromedial vision. The tissue that formed the tunnel merged with the tendon (black arrow).

Semimembranosus muscle cuts showed the muscular fibers that formed several fascicles identified in the ultrasound study, and an aponeurosis inside the muscle that corresponded to the end of the proximal aponeurosis of the muscle. At the medial-posterior border, the muscle presented an aponeurotic border that thickened distally (Figure 7). This medial border became more posterior before the tendon divided, forming the DT and AT of the semimembranosus muscle after dividing meanwhile, the anterior part of the muscle and tendon gave rise to the RT (or the oblique popliteal ligament). This converged on the muscle and tendon, confirming the tendon rotation seen on ultrasound (Figure 1F–J).

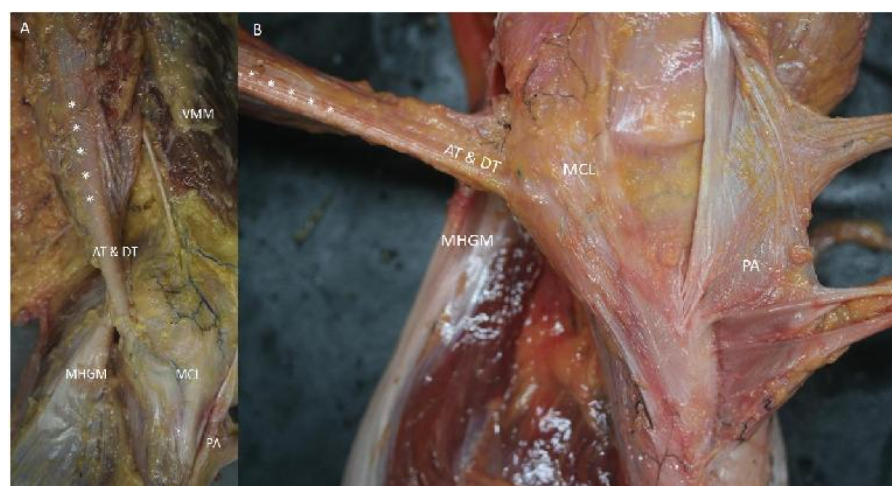


Figure 7. (A,B) Vision of the medial side of left knee with the pes anserinus (PA) retired. The aponeurosis of the semimembranosus muscle (white *), originated at the medial side of the muscle, follows as the tendon of the anterior and direct tendon (AT and DT) to insert at the medial side of the tibia covered by the medial collateral ligament of the knee—(MCL). Vastus medialis—(VMM); Medial head of the gastrocnemius muscle—(MHGM).

To observe the divisions of the main tendon of the semimembranosus muscle, we needed to remove the medial head of the gastrocnemius muscle from distal to proximal and cut the soleus muscle. We also needed to cut the inferior part of the medial collateral ligament because it made a tunnel and helped to fix the AT and DT, preventing visualization. The dye that marked the AT and DT remained inside this tunnel in all the cases, and even progressed up to the main tendon without extraversion. After cutting the medial collateral ligament, we observed that the AT had a transverse direction and inserted in a fosse of the medial border of the medial condyle of the tibia. The DT followed inferiorly and longitudinally under the medial collateral ligament (Figure 8A,B). At this point, a bursa was located with an inverted U-shape that involved the indirect tendon.

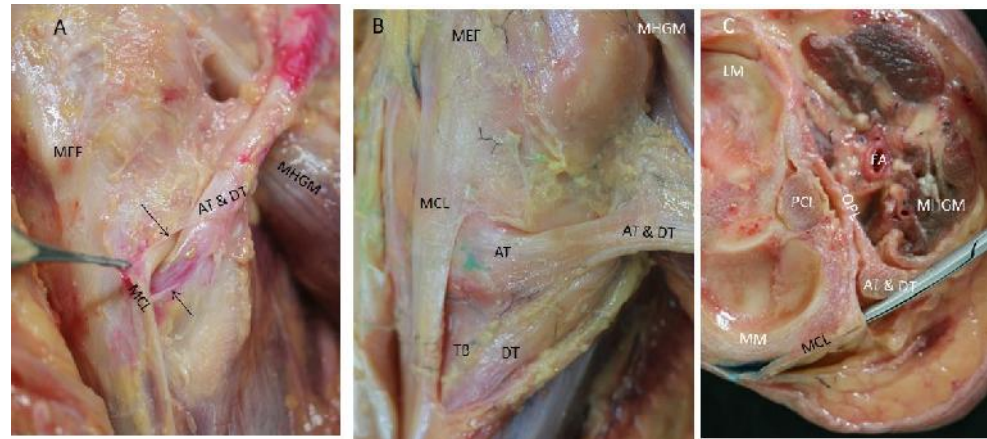


Figure 8. View of the medial side of the right knee (A) It is possible to observe the anterior tendon (AT) injected in red by ultrasound-guided injection and direct tendon (DT) before they separate and their relation with the medial collateral ligament (MCL) of the knee. The ligament made a tunnel for both portions (short black arrows). Medial epicondyle of the femur bone (MEF), medial head of the gastrocnemius muscle (MHGM). (B) Cutting part of the medial collateral ligament allowed us to visualize the anterior and direct tendons (AT and DT) of the semimembranosus inserted at the medial side of the tibia bone (TB). (C) Transversal cut of a right knee allowed us to visualize the disposition of the medial collateral ligament of the knee and its relation with the tendons of the semimembranosus and medial meniscus—(MM). OPL inserts at the posterior side of the capsule of the knee. Lateral meniscus—(LM); Posterior cruciate ligament—(PCL); Medial head of the gastrocnemius muscle—(MHGM); Femoral artery—(FA).

The RT or oblique popliteal ligament were covered by the medial head of the gastrocnemius muscle but were separated from it by a fascia. After removing the medial head of the gastrocnemius muscle, the entire oblique popliteal ligament had a transverse direction and a superolateral reflection reject to the posterior knee. Its trajectory was from medial to lateral and from inferior to superior, reaching the posterior knee capsule and the lateral condyle of the femur (Figure 3B). Here, there was a deep connection between the tendon and the posterior knee capsule, which were impossible to isolate. An expansion to the menisiofemoral ligament was also observed, but we could not prove any connection between this part of the oblique popliteal ligament and the medial or lateral meniscus. Handmade traction of the main tendon of the semimembranosus muscle did, however, tense the posterior capsule and indirectly mobilize the medial and lateral meniscus. Also, the histological study showed that the oblique popliteal ligament had three layers that were joined by loose connective tissue (Figure 3C,D). Vessels were observed parallel to these layers, and in one case, an arterial vessel crossed the oblique popliteal ligament.

The dye injected by ultrasound was present at the AT and DT in all cases, confirming the correct visualization by ultrasound, but was only present at the RT in 80% despite this; the dye was always located inferior to the tendon.

Measurements were only recorded in 32 of the 38 knees, because 6 knees were used for transversal cuts. Among these, 18 were from men (56.3%) and 14 were from women (43.8%), while 21 were right-sided (65.6%) and 11 were left-sided (34.4%). The width, thickness, and diameter measurements of the muscle were 38.29 mm, 14.36 mm, and 112.64 mm, respectively; the corresponding measurements for the tendon (before its division) were 11.81 mm, 4.69 mm, and 38.44 mm (Table 1). Statistical analysis showed that neither gender nor laterality affected these measures. Similarly, there were no differences between the muscle and the tendon measurements (Table 2).

Table 1. Morphometry of the tendon and muscle semimembranosus 95% IC: 95% confidence interval. SD—Standard deviation.

	TENDON (mm)			MUSCLE (mm)		
	Width	Thickness	Diameter	Width	Thickness	Diameter
Average (SD)	11.8 (1.43)	4.69 (0.72)	38.44 (2.93)	38.29 (4.33)	14.36 (3.23)	112.64 (10.74)
95% CI	11.30–12.32	4.43–4.95	37.38–39.50	36.73–39.85	14.36–13.2	108.77–116.51
Median (IQR)	12.21 (2)	4.65 (0.96)	38.77 (2.5)	39 (5.08)	13.1 (4.43)	109.8 (22.42)
Test Shapiro–Wilk (<i>p</i>)	0.86 (0.000)	0.961 (0.20)	0.879 (0.14)	0.940 (0.07)	0.85 (0.001)	0.894 (0.004)

Table 2. Morphometry of the tendon and muscle (10 cm before the tendon) semimembranosus according to the sex and side.

Measures Distribution of Tendon and Muscle According to the Sex ⁽¹⁾		SEX		Test U Mann–Whitney
		Man	Woman	
TENDON (mm)	width	11.70 (1.48) 10.96–12.3	11.96 (1.39) 11.15–12.76	140.5 (0.582)
	thickness	4.91 (0.59) 4.61–5.20	4.41 (0.78) 3.95–4.86	80.0 (0.081)
	diameter	38.41 (3.28) 36.78–40.0	38.47 (2.53) 37–39.9	130.0 (0.879)
MUSCLE (mm)	width	38.5 (4.23) 36.4–36.44	37.9 (4.59) 12.38–15.1	101.0 (0.342)
	thickness	14.85 (2.35) 12.97–16.7	13.74 (2.33) 12.38–15.1	110.0 (0.558)
	diameter	111.2 (10.1) 106.2–116.2	114.5 (11.7) 107.8–121.3	147.0 (0.425)
Measures distribution of tendon and muscle according to the side ⁽¹⁾		SIDE		
		Right	Left	
TENDON (mm)	width	11.83 (1.34) 11.23–12.44	11.76 (1.65) 10.66–12.87	126.0 (0.696)
	thickness	4.69 (0.68) 4.39–5.01	4.67 (0.82) 4.13–5.23	117.5 (0.938)
	diameter	38.57 (3.12) 37.15–39.99	38.19 (2.66) 36.40–39.97	103.0 (0.639)
MUSCLE (mm)	width	37.85 (4.52) 35.80–39.91	39.12 (3.99) 36.44–41.81	129.0 (0.611)
	thick	14.49 (3.59) 12.85–16.12	14.13 (2.54) 12.42–15.83	115.0 (1.0)
	diameter	111.38 (10.87) 107.96–122.16	115.1 (10.57) 107.96–122.16	145.0 (0.254)

⁽¹⁾ Average, standard deviation, 95% confidence interval of the average.

No statistically significant differences were observed in the continuous variables that reflect the dimensions of the tendon and muscle. The median and distribution within the variables were the same for each of these continuous variables.

There is no correlation between the width, thickness, or diameter of the tendon and muscle.

All cases had a synovial bursa between the semimembranosus muscle and the medial head of the gastrocnemius muscle before the semimembranosus tendon divided. This corresponded to the hypoechogenic comma-shaped image on the ultrasound. We did not observe the continuity of the capsule of the knee or the tendon of the medial head of the gastrocnemius muscle under the capsule (Figures 1I,J and 4B).

One specimen showed a variation in its muscular belly width by 0.5 mm before transitioning to the main tendon. This small muscle was separated from the tendon and inserted into the thigh fascia at this point.

The embryonic study at different months showed that the anatomy was very similar to that observed in adults. However, we did not observe a distal rotation of the tendon, only seeing posterior muscular fibers and the anteromedial aponeurosis at the side of the muscle (Figure 9). Thereafter, the tendon divided as for adults.

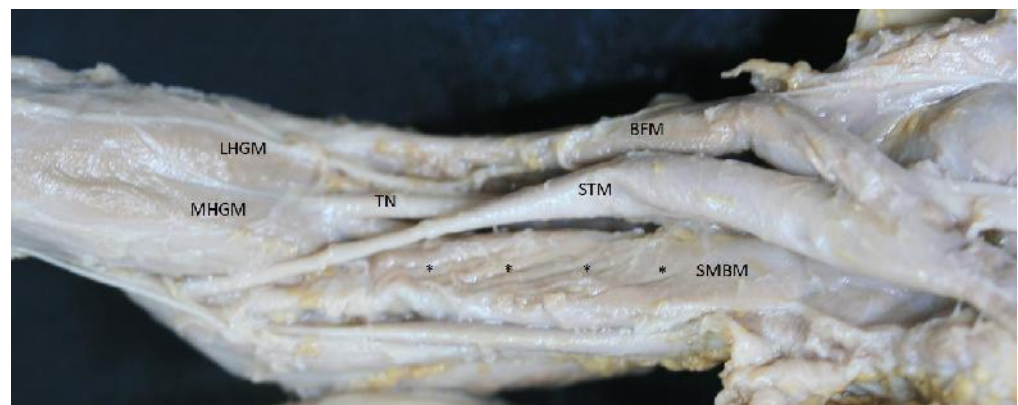


Figure 9. The posterior side of the thigh from fetuses aged 33 weeks old. It shows the posterior muscular fibers (black *) of the semimembranosus muscle (SMBM) without aponeurosis. Semitendinosus—(STM); biceps femoris muscle—(BFM); medial head—(MHGM); lateral head—(LHGM) of gastrocnemius muscle; tibial nerve—(TN).

3.3. Histological Study

The histology of the common tendon before it separated into the three main portions showed a difference. RT was notably separated from the AT and DT, which remained together by less dense connective tissue (Figure 10B). Particularly, RT presented tendinous fibers that ran parallel and compact while the AT and DT were also formed by dense connective tissue that ran in several directions and were surrounded by a layer of dense connective tissue, corresponding to the aponeurosis of the medial border of the semimembranosus muscle that became posterior (Figure 10B–E).

Detailed study of the oblique popliteal ligament showed that it was formed by three layers (as in the anatomical study) separated by lax connective tissue. Also, the anterior layer was related to the capsule and shared connections (Figure 3C,D).

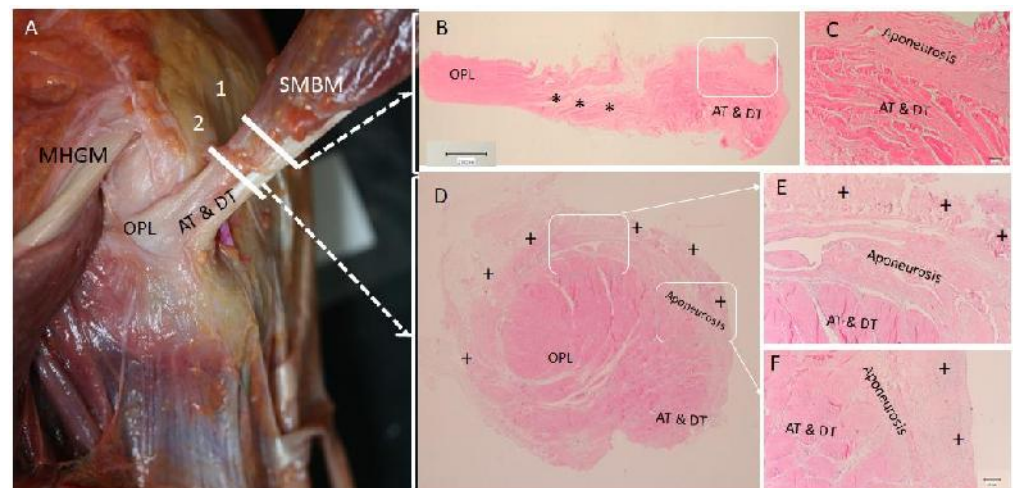


Figure 10. (A) An anatomical image of the posteromedial view of a left knee. The semimembranosus muscle (SMBM) will give the anterior and direct tendons (AT and DT) and oblique popliteal ligament (OPL). The medial head of the gastrocnemius muscle (MHGM) is superiorly to OPL. Lines 1 and 2 marked the levels of cut of the semimembranosus muscle. (B) Level 1: Transversal and histological view where two different points of the dense connective tissue belong to the anterior (AT) and direct tendons (DT) and oblique popliteal ligament (OPL). They are separated by loose connective tissue (black *). (C) It corresponds to a magnified vision of the white square of the picture (B). The aponeurosis of the muscle semimembranosus has a deep relation with the AT and DT. It does not surround the OPL. (D) It corresponds to a transversal and histological view of the tendon at the level 2, inferiorly just before the different tendons of the SMBM separate. The aponeurosis surrounds the AT and DT but not the OPL. There is other dense connective tissue (black +) that surrounds all the tendons that correspond to the different tissues as the medial collateral ligament, medial epicondyle, popliteal muscle. (E) Image of the aponeurosis and the close relation with the AT and DT. (E,F) corresponds to a magnified vision of the white squares of the pictures.

4. Discussion

A notable discovery of this study is the helicoidal disposition of the distal semimembranosus muscular and myotendinous fibers before their division into the AT, DT, and RT. We hypothesize that this disposition at its distal insertion affords a better tolerance to traction forces and could protect against potential damage caused by injury. This is similar to the proximal insertion of the semimembranosus muscle at the ischial tuberosity, where it is inserted with a double tendinous portion and oriented in several angles. As a protective factor, this could account for the lower incidence of injuries when compared to the semitendinosus muscle and the long head of the biceps femoral tendon [28]. The distal insertion with rotation is secured for different expansions to anatomical structures, as described in the results, that fix the main tendon and maintain its rotation. Although we cannot compare this description to previous studies, other authors have described these expansions as part of the different insertions of the main tendon [11].

Regarding the insertion of some of the RT or oblique popliteal ligament fibers at the meniscus, we could not show direct insertion at the lateral meniscus [4,10] or medial meniscus, as described elsewhere [29]. However, the close association of the oblique popliteal ligament with the knee capsule could explain the capsular tears and meniscus injuries [12]. We observed fibers of the external layer of the knee capsule surrounding the semimembranosus tendon, demonstrating continuity of the joint capsule with the posterior horn of the medial meniscus. Results also showed that applying a traction force to the semimembranosus tendon had repercussions in the posterior knee capsule and medial meniscus. This shows the importance of the oblique popliteal ligament in the knee capsule and the need to consider it in rehabilitation treatments involving these structures. Other authors consider this a possibility and contraindicate active work on

the semimembranosus muscle in early rehabilitation due to the possible negative impact of traction of the semimembranosus distal tendon on sutures of the posterior horn of the medial meniscus, through the posterior joint capsule [29–32]. No consensus has been reached [30,32,33].

Our study cannot verify whether active work on the semimembranosus muscle can benefit or harm the initial rehabilitation of such interventions. It does, however, allow us to argue that any semimembranosus action that involves oblique popliteal ligament traction at this site will have repercussions on the joint capsule of the knee and on the medial meniscus (i.e., whether active or passive; in an open, closed or mixed kinetic chain; in internal, external, total, or intermediate working amplitude; or in an isometric, concentric or eccentric way). Therefore, this requires consideration in the initial phase of post-surgical rehabilitation for repairs to the posterior horn of the medial meniscus. Early, low-intensity traction may be beneficial by facilitating proprioceptive awakening, whereas early high-intensity traction can be harmful due to the risk of tearing an unhealed suture.

These relationships between the capsule and the medial meniscus and the impact or semimembranosus muscle traction on both could also explain why the distal insertions of the semimembranosus muscle follow different tendons. If it was only anchored to one in the posterior part of the joint capsule, excessive forces could cause injury through avulsion of the anatomical structures on which it exerted traction. This also relates to the observed origin of the oblique popliteal ligament which arises directly from the muscular part of the semimembranosus muscle. By contrast, the architecture with multiple insertions that form the deep pes anserinus allows the total force exerted by the semimembranosus muscle to be distributed between the AT, DT, and RT when flexing (in an open kinetic chain), or stabilizing (in a closed kinetic chain) the knee, breaking the force down into different vectors will minimize the risk of traction injury.

The origin of the DT and AT from the medial aponeurosis, which becomes the principal component of the tendon, could also explain the different mechanisms of injury to the medial knee and medial collateral ligament. However, this would be countered by the many connections of medial anatomical structures that we have described.

The differences in disposition between the fetal and adult muscles is an important finding. Although the insertion points of the distal tendons of the semimembranosus muscle change during gestation and although its final disposition may be modified even after birth [15] it was notable that the rotation of the muscle and tendon was only present in adults. The lack of this rotational component in the different fetal periods may reflect the absence of certain mechanical stimuli while in uterus, such as traction stimuli on the tendon or load stimuli on the lower extremities. It is known that these trigger adaptations and structural changes in the myotendinous tissues on which they act [34,35]. Thus, unlike simple movement stimuli that are present from 7–8 weeks of gestation [36], the semimembranosus muscle does not exert or receive biomechanical stresses that fight against gravity and does not have need to exert a stabilizing action under loading on the knee or on the lumbopelvic complex. This makes the helical disposition unnecessary until after birth, when the muscle will be subject to the demands of standing and the need for a stabilizing action. Such a change in stressors probably stimulates the adult arrangement of distal insertions with anchoring in different tendons to allow greater resistance to traction and a better distribution of the forces exerted by muscle contraction which is facilitated by the rotational component.

This study has some limitations that should be considered, as the total height of the donors and the body mass index that are not included in the study. Nevertheless, these parameters do not modify the morphology of the analyzed structures and the helical arrangement of the semimembranosus muscle and tendon. Future studies should confirm these results considering the proposed limitations.

5. Conclusions

The results of this study showed that ultrasound is a valid tool for identifying the divisions of the distal tendon of the semimembranosus muscle and its relationship with the adjacent anatomical structures.

Anatomically, it has been proven that the distal fibers of the semimembranosus muscle adopt a helical arrangement that continues and extends until its division into the three main distal tendons. This helical arrangement does not appear in fetuses between 29 and 38 weeks of age.

No direct anatomical continuity has been observed between the oblique popliteal ligament and the meniscus, but it has been proven that applying a traction force on the tendon of the semimembranosus muscle has an indirect impact on the medial meniscus due to the transmission of force traction through the posterior capsule of the knee. This point should be considered in the early stages of rehabilitation of a posterior horn of the medial meniscus repair.

Author Contributions: Conceptualization, P.I.-C. and M.M.-P.; methodology, P.I.-C., M.M.-P. and A.P.-B.; software P.I.-C. and J.O.-S.; validation, P.I.-C., M.M.-P., I.M. and C.M.; formal analysis, P.I.-C., J.O.-S. and M.M.-P.; statistical study, J.O.-S.; investigation, P.I.-C., M.M.-P., S.O.-M., J.B. and X.S.; writing—original draft preparation, P.I.-C. and M.M.-P.; writing—review and editing, M.M.-P., I.M., A.P.-B., S.O.-M., J.O.-S. and C.M.; supervision, M.M.-P. and I.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The authors have no relevant financial or non-financial interest to disclose. This research received no external funding.

Institutional Review Board Statement: This study was conducted according to the guidelines of the Declaration of Helsinki and was approved by the Ethics Committee of Universitat de Barcelona: Institutional Review Board (IRB00003099, 28 February 2022).

Informed Consent Statement: All the donators gave their informed consented to participate in this study, to have their results published, and for the use of their bodies for investigation and teaching at the university.

Data Availability Statement: The datasets used in this work can be accessed upon request.

Acknowledgments: The authors are very grateful to all the body donors that enabled this study to be conducted.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Llusà, M.; Merí, À.; Ruano, D. *Manual y Atlas Fotográfico de Anatomía del Aparato Locomotor*, 1st ed.; Médica Panamericana: Madrid, Spain, 2004; 358p.
2. Zhong, S.; Wu, B.; Wang, M.; Wang, X.; Yan, Q.; Fan, X.; Hu, Y.; Han, Y.; Li, Y. The anatomical and imaging study of pes anserinus and its clinical application. *Medicine* **2018**, *97*, e0352. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
3. Olewnik, L.; Gonera, B.; Podgórski, M.; Polguj, M.; Jezierski, H.; Topol, M. A proposal for a new classification of pes anserinus morphology. *Knee Surg. Sport Traumatol. Arthrosc.* **2019**, *27*, 2984–2993. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Beltran, J.; Matityahu, A.; Hwang, K.; Jbara, M.; Maimon, R.; Padron, M.; Mota, J.; Beltran, L.; Sundaram, M. The distal semimembranosus complex: Normal MR anatomy, variants, biomechanics and pathology. *Skelet. Radiol.* **2003**, *32*, 435–445.
5. Benninger, B.; Delamarter, T. Distal semimembranosus muscle-tendon-unit review: Morphology, accurate terminology, and clinical relevance. *Folia Morphol.* **2013**, *72*, 1–9. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
6. Pedersen, R.R. The Medial and Posteromedial Ligamentous and Capsular Structures of the Knee: Review of Anatomy and Relevant Imaging Findings. *Semin. Musculoskelet Radiol.* **2016**, *20*, 12–25. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
7. Vieira, T.D.; Pioger, C.; Frank, F.; Saithna, A.; Cavaignac, E.; Thaumat, M.; Cottet, B. Arthroscopic Dissection of the Distal Semimembranosus Tendon: An Anatomical Perspective on Posteromedial Instability and Ramp Lesions. *Arthrosc Tech.* **2019**, *8*, e987–e991. [[CrossRef](#)]
8. Sims, W.F.; Jacobson, K.E. The Posteromedial Corner of the Knee: Medial-Sided Injury Patterns Revisited. *Am. J. Sports Med.* **2004**, *32*, 337–345. [[CrossRef](#)]

9. De Maeseneer, M.; Shahabpour, M.; Lenchik, L.; Milants, A.; De Ridder, F.; De Mey, J.; Cattrysse, E. Distal insertions of the semimembranosus tendon: MR imaging with anatomic correlation. *Skelet. Radiol.* **2014**, *43*, 781–791. [\[CrossRef\]](#)
10. Kim, Y.C.; Yoo, W.K.; Chung, I.H.; Seo, J.S.; Tanaka, S. Tendinous insertion of semimembranosus muscle into the lateral meniscus. *Surg. Radiol. Anat.* **1998**, *19*, 365–369. [\[CrossRef\]](#)
11. LaPrade, R.F.; Morgan, P.M.; Wentorf, F.A.; Johansen, S.; Engebretsen, L. The anatomy of the posterior aspect of the knee: An anatomic study. *J. Bone Jt. Surg. Ser. A* **2007**, *89*, 758–764. [\[CrossRef\]](#)
12. Cavaignac, E.; Sylvie, R.; Teulières, M.; Fernandez, A.; Frosch, K.H.; Gomez-Bouchet, A.; Sonnery-Cottet, B. What Is the Relationship Between the Distal Semimembranosus Tendon and the Medial Meniscus? A Gross and Microscopic Analysis from the SANTI Study Group. *Am. J. Sports Med.* **2021**, *49*, 459–466. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
13. Benninger, B.; Delamarter, T. The “Oblique Popliteal Ligament”: A Macro- and Microanalysis to Determine If It Is a Ligament or a Tendon. *Anat. Res. Int.* **2012**, *2012*, 151342. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
14. Nakamura, T.; Suzuki, D.; Murakami, G.; Cho, B.H.; Fujimiya, M.; Kozuka, N. Human fetal anatomy of the posterior semimembranosus complex at the knee with special reference to the gastrocnemio-semimembranosus bursa. *Knee* **2011**, *18*, 271–277. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
15. Jin, Z.W.; Abe, H.; Jin, Y.; Shibata, S.; Murakami, G.; Rodríguez-Vázquez, J.F. Positional changes in tendon insertions from bone to fascia: Development of the pes anserinus and semimembranosus muscle insertion in human fetuses. *Folia Morphol.* **2016**, *75*, 503–511. [\[CrossRef\]](#)
16. Balius, R.; Pedret, C.; Iriarte, I.; Sáiz, R.; Cerezal, L. Sonographic landmarks in hamstring muscles. *Skelet. Radiol.* **2019**, *48*, 1675–1683. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
17. De Maeseneer, M.; Marcelis, S.; Boulet, C.; Kichouh, M.; Shahabpour, M.; De Mey, J.; Cattrysse, E. Ultrasound of the knee with emphasis on the detailed anatomy of anterior, medial, and lateral structures. *Skelet. Radiol.* **2014**, *43*, 1025–1039. [\[CrossRef\]](#)
18. Laprade, M.D.; Kennedy, M.I.; Wijdicks, C.A.; Laprade, R.F. Anatomy and biomechanics of the medial side of the knee and their surgical implications. *Sports Med. Arthrosc.* **2015**, *23*, 63–70. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
19. Saygi, B.; Yildirim, Y.; Berker, N.; Ofluoglu, D.; Karadag-Saygi, E.; Karahan, M. Evaluation of the neurosensory function of the medial meniscus in humans. *Arthrosc. J. Arthrosc. Relat. Surg.* **2005**, *21*, 1468–1472. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
20. Khoshnoodi, P.; Tehranzadeh, A.D.; Dunn, J.M.; Tehranzadeh, J. Semimembranosus tendon avulsion fracture of the posteromedial tibial plateau associated with posterior cruciate ligament tear and capsular rupture. *Skelet. Radiol.* **2014**, *43*, 239–242. [\[CrossRef\]](#)
21. Bylund, W.E.; de Weber, K. Semimembranosus tendinopathy: One cause of chronic posteromedial knee pain. *Sports Health* **2010**, *2*, 380–384. [\[CrossRef\]](#)
22. Lundquist, R.B.; Matcuk, G.R.; Schein, A.J.; Skalski, M.R.; White, E.A.; Forrester, D.M.; Patel, D.B. Posteromedial corner of the knee: The neglected corner. *Radiographics* **2015**, *35*, 1123–1137. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
23. Rothstein, C.P.; Laorr, A.; Helms, C.A.; Tirman, P.F.J. Semimembranosus-tibial collateral ligament bursitis: MR imaging findings. *Am. J. Roentgenol.* **1996**, *166*, 875–877. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
24. Beltran, L.; Ghazikhanian, V.; Padron, M.; Beltran, J. The proximal hamstring muscle-tendon-bone unit: A review of the normal anatomy, biomechanics, and pathophysiology. *Eur. J. Radiol.* **2012**, *81*, 3772–3779. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
25. Yoon, M.A.; Choi, J.Y.; Lim, H.K.; Yoo, H.J.; Hong, S.H.; Choi, J.A.; Kang, H.S. High prevalence of abnormal MR findings of the distal semimembranosus tendon: Contributing factors based on demographic, radiographic, and MR features. *Am. J. Roentgenol.* **2014**, *202*, 1087–1093. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
26. Chahal, J.; Al-Taki, M.; Pearce, D.; Leibenberg, A.; Whelan, D.B. Injury patterns to the posteromedial corner of the knee in high-grade multiligament knee injuries: A MRI study. *Knee Surg. Sport Traumatol. Arthrosc.* **2010**, *18*, 1098–1104. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
27. Haberfehlner, H.; Maas, H.; Harlaar, J.; Becher, J.G.; Buizer, A.I.; Jaspers, R.T. Freehand three-dimensional ultrasound to assess semitendinosus muscle morphology. *J. Anat.* **2016**, *229*, 591–599. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
28. Sato, K.; Nimura, A.; Yamaguchi, K.; Akita, K. Anatomical study of the proximal origin of hamstring muscles. *J. Orthop. Sci.* **2012**, *17*, 614–618. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
29. Julie, M.; Fritz, J.J.; Irrgang, C.D.H. Rehabilitation Following Allograft Meniscal Transplantation. *J. Orthop. Sport Phys. Ther.* **1996**, *24*, 98.
30. Dean, R.S.; DePhillipo, N.N.; Monson, J.K.; LaPrade, R.F. Peripheral Stabilization Suture to Address Meniscal Extrusion in a Revision Meniscal Root Repair: Surgical Technique and Rehabilitation Protocol. *Arthrosc. Tech.* **2020**, *9*, e1211–e1218. [\[CrossRef\]](#)
31. Bizzini, M.; Gorelick, M.; Drobny, T. Lateral meniscus repair in a professional ice Hockey goaltender: A case report with a 5-year follow-up. *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* **2006**, *36*, 89–100. [\[CrossRef\]](#)
32. Cavanaugh, J.T.; Killian, S.E. Rehabilitation following meniscal repair. *Curr. Rev. Musculoskelet Med.* **2012**, *5*, 46–58. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
33. Perkins, B.; Gronbeck, K.R.; Yue, R.A.; Tompkins, M.A. Similar failure rate in immediate post-operative weight bearing versus protected weight bearing following meniscal repair on peripheral, vertical meniscal tears. *Knee Surg. Sport Traumatol. Arthrosc.* **2018**, *26*, 2245–2250. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
34. Mackey, A.L.; Heinemeier, K.M.; Koskinen, S.O.A.; Kjaer, M. Dynamic adaptation of tendon and muscle connective tissue to mechanical loading. *Connect. Tissue Res.* **2008**, *49*, 165–168. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)

35. Rot-Nikcevic, I.; Reddy, T.; Downing, K.J.; Belliveau, A.C.; Hallgrímsson, B.; Hall, B.K.; Kablar, R. Myf5^{-/-}: MyoD^{-/-} amyogenic fetuses reveal the importance of early contraction and static loading by striated muscle in mouse skeletogenesis. *Dev. Genes Evol.* **2006**, *216*, 1–9. [[CrossRef](#)]
36. Yamaguchi, Y.; Kodama, R.; Yamada, S. Morphogenetic progression of thigh and lower leg muscles during human embryonic development. *Anat. Rec.* **2023**, *306*, 2072–2080. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

5.- DISCUSIÓN

5.- DISCUSIÓN

El músculo semimembranoso, junto con los músculos semitendinoso y bíceps femoral, forma parte de la musculatura posterior del muslo y tienen una inserción proximal común en la tuberosidad isquiática, por lo que está justificado que en su nomenclatura se haga referencia al vocablo “isquio-” cuando se habla de ellos como grupo muscular conjunto. Sin embargo, existe una controversia semántica en relación a la terminología que debería utilizarse al hacer referencia a este grupo de músculos en su inserción distal, puesto que en la literatura es posible encontrar tanto el uso del término “músculos isquiotibiales” como del término “músculos isquiosurales” o “músculos isquiocrurales”. Considerando la inserción del músculo bíceps femoral en el peroné, y no en la tibia, estamos de acuerdo con aquellos autores que utilizan el término de “músculos isquiosurales/isquiocrurales” [1,3], en detrimento del de “músculos isquiotibiales” [158] puesto que, por definición, este último conllevaría una falta de exactitud descriptiva anatómica que no se ajusta al concepto terminológico que conlleva la palabra “isquiotibial”.

Por el mismo motivo tampoco se respalda la reciente propuesta en la que se insta a que se incluya en la próxima edición del tratado de *Terminología Anatómica Internacional* el término de “músculos isquiotibiales” [158]. Dicho tratado contiene los nombres oficiales de las estructuras anatómicas y ha publicado sus últimas ediciones en el año 2019 (en inglés) y en el 2001 (en español). En ellas se refiere a estos músculos como los “músculos del compartimento posterior del muslo” o “*Compartimentum posterius femoris*” (término 2637, en la última edición en inglés (FIPAT 2019)), y como “Compartimento femoral posterior” o “músculos del compartimento femoral flexor” (término A04.7.01.003 en la última versión en idioma español en 2001 (FCAT, 2001)) [158].

Los autores que defienden la inclusión del término “músculos isquiotibiales” se basan en dos aspectos: el primero, debido a un uso más extendido en la literatura médica que los términos “músculos del compartimento femoral posterior” y “músculos del compartimento femoral flexor” y, el segundo, porque consideran que anatómicamente es un término descriptivo y unívoco [158].

Existen revisiones al respecto que demuestra un mayor porcentaje del uso de “músculos isquiotibiales” en comparación con los términos “músculos del compartimento femoral posterior” y “músculos del compartimento femoral flexor” [158] sin embargo, no compartimos

su criterio y consideramos que el mero hecho de una mayor frecuencia de uso de un término no debe ser motivo suficiente para que sea dado por válido.

Nuestra opinión es usar el término de “músculos isquiosurales” o “músculos isquiocrurales” cuando se hace referencia al conjunto formado por el SM, el ST y el BF ya que refleja la realidad anatómica y consideramos que es un término más correcto, que tiene en cuenta sus diferentes puntos de inserción proximal y distales. Por ello, apoyamos el criterio de limitar el uso del término de “musculatura isquiotibial” o “músculos isquiotibiales” al hacer referencia exclusivamente al SM y el ST, como describen algunos manuales de anatomía [1], puesto que ambos son los únicos que cumplen la condición de tener su inserción proximal en la tuberosidad isquiática y su inserción distal en la tibia [1,2].

Está en discusión también la inclusión del músculo aductor mayor como miembro del grupo de dichos “músculos isquiotibiales” [26]. Esto es debido a que este músculo comparte algunas de sus acciones biomecánicas con el SM, el ST y/o el BF, y que por su localización y relaciones anatómicas podría ser considerado como uno de los músculos que forman parte del grupo de la musculatura del compartimento posterior femoral. Sin embargo creemos que no se justifica su inclusión porque, si bien cumple condiciones como localizarse en el compartimento posterior del muslo o compartir su origen proximal en la tuberosidad isquiática (y en la rama del isquión), ninguna de las dos porciones por las que está formado se insertan en la tibia, sino que lo hacen en el labio medial de la línea áspera del fémur (la porción lateral) y en la tuberosidad aductora del fémur (la porción medial) [1].

Otro aspecto semántico a remarcar es el uso de los términos “inserción proximal” e “inserción distal” en el momento de hacer referencia a las partes iniciales y finales de los músculos estudiados. En muchos tratados de anatomía escritos en español, es frecuente encontrar que se describen las partes del principio y del final de un músculo como “origen” e “inserción” [1–3]. Se considera que normalmente el término “origen” se corresponde con el extremo proximal del músculo y el término “inserción” lo hace con el extremo distal [3]. Sin entrar en contradicción con este concepto consideramos que es más apropiado hacer uso de una terminología exclusivamente descriptiva en relación a la terminología anatómica que define el término “proximal” como aquella estructura que está más cerca de la raíz del miembro (es decir, del tronco) y “distal” como aquella estructura que está más lejos de la raíz del miembro [1]. Este criterio coincide con la nomenclatura que aparece en los tratados en lengua anglosajona en los

que se usa el concepto “*attachment*” en su traducción como “unión/fijación”, diferenciando también si la unión es proximal o distal [4].

Respecto a la descripción exhaustiva de la inserción proximal de los músculos isquiosurales, y en base a los hallazgos obtenidos en nuestro estudio ecográfico, podemos confirmar una inserción independiente del SM y la CLBF en la tuberosidad isquiática mediante dos tendones mientras que el ST se origina mediante fibras musculares inferior y medialmente al tendón de la CLBF. Estos resultados contrastan con los obtenidos por otros autores que describen lo contrario y que defienden que los tres músculos se insertan en la tuberosidad isquiática mediante un tendón común [8]. El estudio anatómico sí mostró fibras tendinosas comunes entre el ST y la CLBF, SM y CLBF, y SM y AM, pero consideramos que, aunque existan conexiones, esto no corresponde a la unión de los tres músculos en la tuberosidad isquiática para formar un tendón común.

El estudio ecográfico del origen de los isquiosurales en la tuberosidad isquiática y con la sonda en el eje corto muestra la visualización y localización del tendón de la CLBF como una estructura más o menos redondeada hiperecogénica situada superomedialmente, mientras que el tendón del SM, con una forma más ovalada hiperecogénica, estaría en una situación inferolateral [50]. Sin embargo, el presente estudio sugiere la necesidad y posibilidad de variar la posición de la sonda de un plano totalmente transversal a uno más oblicuo, en algunos casos, para obtener una imagen nítida de estos dos tendones. Este hecho no se puede contrastar con ninguna otra referencia bibliográfica. Seguramente obvian estas descripciones porque los estudios ecográficos son muy dinámicos y con cambios constantes en la posición de la sonda. Sin embargo, para reproducir mejor el estudio, consideramos fundamental describirlo. En los casos descritos en los que existía una mala visualización ecográfica de estas estructuras solía coincidir con la degeneración de estos tendones, sobre todo en población de edad avanzada, hecho comprobado posteriormente a través del estudio anatómico con la disección. Este resultado coincide con otros autores que apuntan a que algunas de las lesiones descritas en la unidad músculo-tendón-hueso pueda estar relacionada con los procesos degenerativos preexistentes [99].

El estudio anatómico permitió confirmar los hallazgos encontrados durante la exploración ecográfica y revelaron además que el origen tendinoso del SM y el de la CLBF tenían fibras en diferentes direcciones. Las fibras tendinosas de la CLBF generalmente eran longitudinales, mientras que las del SM tenían una posición vertical y transversal. Este último hallazgo coincide con lo descrito por otros autores que, además de remarcar que el tendón del SM es claramente independiente del tendón conjunto del ST y de la CLBF, describen que su orientación tiene dos

direcciones diferentes, antes de que se combinen para formar un único tendón grueso en la parte distal de la tuberosidad isquiática: la primera de ellas, más lateral y más mayoritaria, se dirige verticalmente hacia el tendón del músculo mientras que la segunda, más medial, se dirige hacia posterior de dicho tendón [10]. Al igual que nuestros resultados, estos estudios enfatizan y añaden que esta doble orientación es exclusiva del SM y no está presente en la inserción proximal de la CLBF ni en la del ST [10]. Respecto a este punto no hemos podido demostrar que esta doble orientación de las fibras del SM sea un factor que minimice el porcentaje de lesiones del SM en comparación con la CLBF, tal y como describen otros autores [23], pero sí que permitiría sugerir que esta característica diferencial podría permitir una mayor tolerancia del origen del SM a la tracción ejercida por la fuerza muscular y podría ser un factor protector ante mecanismos lesionales.

Creemos relevante también la visualización ecográfica, comprobada con el posterior estudio anatómico, del retináculo que envuelve al SM y CLBF, confirmando los hallazgos de otros estudios [159]. En relación con lo descrito, cualquier signo de discontinuidad de este retináculo podría poner en alerta de posibles lesiones tendinosas en el origen de estos músculos. De la misma manera, la descripción de un retináculo cubriendo el nervio ciático lateralmente al origen del SM y la CLBF podría ayudar a considerar atrapamientos de este nervio que podrían ser detectados con el estudio ecográfico. Además y en otro ámbito, dada su facilidad de localización, también se puede considerar un posible punto de abordaje del nervio ciático, de forma fácil y más segura. Estos datos no se pueden contrastar con ningún otro estudio.

Otra relación importante de la inserción proximal del SM y CLBF en la tuberosidad isquiática, descrita ecográfica, anatómica e histológicamente, corresponde a la continuidad de la CLBF con el ligamento sacrotuberoso. Esta relación argumenta otros estudios que describen que la fuerza de la CLBF en su origen puede producir una tensión del ligamento sacrotuberoso y ésta, a su vez, repercute en la articulación sacroilíaca y columna lumbar, pudiendo ocasionar patología lumbar [65].

El seguimiento distal desde el origen del SM y de la CLBF y a través del estudio ecográfico nos permitió, de acuerdo con otros autores, observar el cambio de posición del SM a una posición más medial y anterior al ST, mientras que la CLBF se colocaba en una posición más superficial y posterior y paralela al ST [26].

El estudio anatómico permitió comprobar con precisión los resultados ecográficos. De esta forma, se comprobó como el tendón de origen del SM, más redondeado y situado en el lado lateral de la tuberosidad isquiática y tal y como han descrito otros autores [32], era el más largo de todos los tendones insertados en la tuberosidad isquiática. Este tendón distalmente se continuaba de manera que la parte más superior en el origen del SM adquiría una forma ovalada, similar a una lágrima y una posición lateral, mientras el resto de tendón más medial pasaba a convertirse en un tendón más delgado, continuándose con una delgada lámina tendinosa (de ahí su nombre). Esta descripción coincide con la realizada por otros autores [5], quienes, además, añaden que, antes de adoptar la forma de una lámina ancha, la trayectoria del tendón proximal del SM hace una torsión gradual hacia posterior dejando de estar colocado en un único plano y colocándose en una dirección anteroposterior, en el plano sagital [5]. Algunos estudios explican que el hecho de que esta torsión provoque una línea de fuerzas resultante que no está en línea con la dirección del tendón le otorga al SM unas características peculiares [24]. De todos modos, los autores de los citados estudios le dan a este dato una connotación negativa y postulan que esta torsión puede hacer que el músculo sea más vulnerable a las lesiones en este punto [24], mientras que, en nuestra opinión, las repercusiones que pueden comportar esta torsión y el giro en espiral (debido a que las fibras posteriores del tendón del SM se continúan en el margen lateral, mientras que las fibras anteriores lo hacen en su parte membranosa medialmente [31]) no puede valorarse de manera aislada si no que deben ser considerada en relación a la totalidad del trayecto muscular, desde la inserción proximal a la distal.

Desde este origen tendinoso se origina el vientre muscular del SM. Este vientre muscular aumenta de tamaño distalmente y se ha podido comprobar cómo las fibras del SM adoptan una disposición helicoidal (espiroidea) que continúa y se prolonga hasta el tendón de inserción distal antes de su división en los tres tendones distales principales. Destacamos que este hecho no se puede contrastar con ningún otro estudio conocido. Además, el estudio del SM mediante cortes transversales anatómicos mostró que las fibras musculares forman varios fascículos (también identificados en el estudio ecográfico) y una aponeurosis en el interior del músculo que corresponde al final del tendón proximal del músculo, dato a considerar en lesiones de este músculo. Tampoco podemos contrastar con ningún otro estudio el hallazgo del origen del tendón directo y el tendón anterior del SM a partir del borde posteromedial, mientras que el tendón recurrente proviene de la parte anterior del músculo y del tendón principal.

Sin embargo creemos que es importante destacar esta rotación, tanto del tendón principal como de las diferentes porciones musculares. Nuestra hipótesis es que esta torsión y su proyección hasta su inserción distal en forma de 3 tendones principales facilita una mejor tolerancia a las fuerzas de tracción y podría ser un factor de protección contra el daño potencial causado por una tracción excesiva.

Por ello y aunque existe por otros autores una falta de descripciones de esta disposición helicoidal de las fibras musculares y miotendinosas distales del SM antes de su división en los tendones directo, anterior y recurrente, creemos que se debería tener en cuenta para interpretar posibles lesiones del SM.

También cabe dar relevancia a que la disección detallada del SM permitió observar que esta división en 3 tendones se inicia más proximalmente y de forma más organizada de lo que la literatura revisada da a entender [11,12].

En relación a esta aparente subdivisión en 3 porciones, los resultados obtenidos permiten dar valor a lo expuesto por algunos autores que proponen que la porción muscular del SM consta de 3 unidades unipennadas y que cada una de ellas tiene un sitio de inserción distal específico, que además está inervado por un nervio específico y que realiza una función específica sobre la articulación de la rodilla [59]. Estas conclusiones están basadas en estudios en los que no se proporcionaron métodos detallados y el análisis y la interpretación de los resultados está dificultado por este hecho [5] sin embargo, estos mismos autores inciden en esta triple división del vientre muscular del SM y han advertido que, en la mayoría de las muestras analizadas en sus estudios y sin que hubiera una uniformidad, los fascículos de dos de estas tres regiones estaban inervados por una misma rama nerviosa del nervio ciático, mientras que los de la tercera lo estaban por una rama diferente a las dos anteriores [5].

La diferente inervación de las distintas porciones musculares del SM podría relacionarse con una posible analogía con el BF. Este músculo presenta una inervación distinta para la CCBF (nervio peroneo común) y la CLBF (nervio tibial). Este hecho plantea, según algunos investigadores, que podría causar una contracción asincrónica entre ambas cabezas del BF y dar lugar a trabajos musculares con ritmos desiguales y puede ser causa de una alteración en la respuesta conjunta frente a una misma sollicitación mecánica, con un posible origen de lesiones [7]. Basándonos en lo anterior y aunque el SM no presente tan claramente distintas cabezas musculares, la diferente inervación en distintos puntos del músculo podría considerarse como una nueva línea de

investigación tanto anatómica como fisiopatológica, que permitiera avanzar en el conocimiento de las causas lesivas del SM y en la prevención de las mismas.

En relación con la disposición espiroidea de la estructura miotendinosa del SM consideramos importante hacer referencia al desarrollo embrionario del músculo y de como evoluciona la disposición de sus inserciones distales durante la gestación.

En nuestro trabajo se incluyó el estudio anatómico de cuatro extremidades de fetos de entre 29 y 38 semanas de gestación embrionaria. Los resultados obtenidos observaron diferencias en la disposición entre los músculos de estas extremidades con respecto a las extremidades de los adultos, siendo la más importante la falta de rotación helicoidal del SM en los fetos estudiados. Este hecho coincide con otros estudios que confirman que los puntos de inserción de los tendones distales del SM cambian durante la gestación y su disposición final puede modificarse incluso después del nacimiento [46]. De aquí se podría incluir que la deambulación y la bipedestación puede contribuir al posible desarrollo helicoidal del SM.

De esta manera, hipotetizamos que la falta de este componente rotacional en los diferentes períodos fetales puede ser debida a la ausencia de ciertos estímulos mecánicos mientras el feto está en el útero, como son los estímulos de tracción sobre el tendón o estímulos de carga en las extremidades inferiores, puesto que se sabe que dichos estímulos desencadenan adaptaciones y cambios estructurales en los tejidos miotendinosos sobre los que actúan [160,161]. Así, a diferencia de los estímulos de movimiento simple (que sí están presentes a partir de las 7-8 semanas de gestación [162]), durante el periodo fetal el SM no ejerce ni recibe tensiones biomecánicas que luchen contra la gravedad y no tiene necesidad de realizar una acción estabilizadora bajo carga sobre la rodilla o sobre el complejo lumbopélvico. Nuestra hipótesis es que esto hace innecesaria la disposición helicoidal hasta después del nacimiento, cuando el músculo ya sí estará sujeto a los cambios en la posición de la pelvis y a la necesidad de una acción estabilizadora de la rodilla, debido a las exigencias de la bipedestación. Consideramos que este cambio en los factores estresantes probablemente condiciona la disposición adulta de las inserciones distales hasta llegar a un anclaje en varios tendones diferentes para permitir una mayor resistencia a la tracción y una mejor distribución de las fuerzas ejercidas por la contracción muscular, cosa que se vería facilitada por el componente rotacional descrito y, sin el cual, no sería del todo efectivo.

La porción muscular del SM se continúa con un tendón distal que se divide en tres subtendones principales que son, de acuerdo con las descripciones clásicas, el tendón anterior el directo y el recurrente [1], y éstas han sido nuestro objeto de estudio. Estas principales divisiones del tendón principal se pueden visualizar con técnicas de radiodiagnóstico como la RMN. Esta técnica, que no ha sido objeto del presente estudio, es la que mejor identifica y con mayor precisión todos los tendones de la inserción distal del SM y permite una mejor visualización de determinadas lesiones o signos sugestivos de patología, especialmente de tendinopatías y de edema peritendinoso [153]. Sin embargo, creemos relevante el estudio ecográfico para una rápida localización de los principales tendones, tal como hemos aportado en este estudio, y su posible relación con otras estructuras anatómicas que pueden ayudar también a su visualización y a la detección de posibles patologías.

La inserción de los diferentes tendones del SM en diferentes puntos de la tibia facilita la importante acción de este músculo. De esta manera, consideramos que si solo se insertara distalmente en un único punto de contacto, ya fuera en el hueso, en la cápsula posterior o en cualquiera de las estructuras anatómicas en las que lo hace, la resultante de las fuerzas transmitidas a través de ese hipotético único tendón podría causar fácilmente lesiones por avulsión de las estructuras anatómicas sobre las que ejerciera tracción. Esta teoría no podemos validarla con ningún otro autor pero creemos que debe tenerse presente. Por este motivo consideramos que las características de la arquitectura de la pata de ganso profunda que forma el SM, constituida por múltiples inserciones, permite que la fuerza total ejercida por el SM, ya sea al flexionar la rodilla (trabajando en cadena cinética abierta) o estabilizándola a nivel anteromedial (trabajando en cadena cinética cerrada), se distribuya entre los tendones principales directo, anterior y recurrente (y sus subdivisiones), descomponiendo la resultante de la fuerza en diferentes vectores y minimizando el riesgo de lesión por tracción sobre las estructuras anatómicas implicadas. A menor escala, se podría establecer un paralelismo con su doble inserción proximal en la tuberosidad isquiática mediante las dos porciones orientadas en diferentes ángulos, tal y como describen algunos autores [10].

Así pues, en ambos casos, consideramos que, tanto en la porción de origen proximal como en la distal, esta disposición de las inserciones mediante diferentes puntos podría considerarse como un factor protector que podría ser uno de los motivos por los que el SM presenta una menor incidencia de lesiones en comparación con el BF. Aunque no hay ningún estudio que haya descrito con anterioridad la torsión helicoidal y, por tanto, su función, nos gustaría aportar que

esta múltiple localización insercional requiere de la existencia del componente de torsión helicoidal para que el SM pueda ejercer mejor su acción.

Por otra parte, respecto a la relación con la inserción distal del SM destacamos que con nuestro trabajo no hemos podido demostrar una inserción directa de ninguna de las fibras del tendón recurrente con el menisco medial, como describen algunos autores [163] ni con el menisco lateral, como apuntan otros [41]. Sin embargo, sí que se ha podido verificar lo descrito en investigaciones previas que han expuesto que la tracción ejercida por el SM sobre la cápsula posterior de la rodilla mediante sus inserciones en el LPO, tensa las estructuras posteromediales cuando, de no hacerlo, permanecerían en un estado de laxitud, lo que comporta una tracción en el cuerno posterior del menisco medial y una retracción posterior resultante del menisco medial [13,76,124]. Este hecho permite considerar la relación a nivel propioceptivo del SM con el menisco medial. Por el contrario, también justificaría que ante una fuerza de tracción importante pudieran producirse algunos desgarros capsulares y lesiones del menisco medial, tal y como mencionan algunos estudios [44].

Por todo ello, coincidimos con el razonamiento de algunos autores cuando exponen que dado que el SM tiene su propia función y sus propias características anatómicas, así como sus particularidades en los mecanismos de lesión en comparación con el resto de los músculos isquiosurales, debería considerarse de manera individualizada cuando se lesiona, pudiendo así aplicarse un tratamiento más apropiado y disminuyendo el riesgo de recidivas y lesiones recurrentes [32]. De igual manera, también defendemos a aquéllos que postulan que también deben considerarse las variaciones intra e intermusculares en el momento de diseñar un plan de recuperación basado en ejercicios puesto que éstos podrían no proporcionar el mismo estímulo a todos los componentes de los isquiosurales [23].

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, nuestro estudio también muestra la necesidad de considerar el papel del SM para comprender la etiología y la fisiopatología de algunas de las lesiones meniscales, aplicar diferentes técnicas quirúrgicas de las reparaciones meniscales y comparar los protocolos de rehabilitación postquirúrgica que impliquen al SM en los tratamientos de rehabilitación.

La tasa de reintervención de las reparaciones meniscales primarias es mayor que la de las meniscetomías [164], no estando claras las causas que pueden estar asociadas a un mejor o peor

resultado [165]. El porcentaje de éxito en las reparaciones meniscales asociadas a una ligamentoplastia del ligamento cruzado anterior es mayor que en el caso de las reparaciones meniscales aisladas [166,167] pero, a pesar de que en muchos casos ambas lesiones están asociadas [130,131], no hay consenso en los protocolos de rehabilitación postquirúrgica en lo que atañe a la lesión meniscal propiamente dicha [167–169]. Tras nuestra investigación hemos concluido que los protocolos de rehabilitación postquirúrgica de una reparación meniscal se dividen en dos grandes grupos: protocolo conservador y protocolo acelerado, siendo el básicamente el tiempo de descarga sobre la pierna intervenida y la progresión de la carga el ítem principal que marca la diferencia entre ellos. En ambos casos es común hacer referencia al uso de férulas y ortesis inmovilizadora, el rango articular permitido en cada momento de la rehabilitación, el tiempo de descarga, la progresión en los porcentajes de carga sobre la extremidad afecta, el trabajo del músculo cuádriceps femoral como elemento activo de la musculatura extensora de la rodilla y las recomendaciones de tiempo para retornar a las actividades diarias y deportivas [125,127,128,167,169–171], pero prácticamente no se aborda la repercusión que puede tener sobre el menisco intervenido una tracción del tendón distal del SM (aplicada a través de la cápsula articular), en las primeras fases de la rehabilitación, lo que supone un importante vacío de conocimiento.

Por este motivo, consideramos que en el abordaje de una rehabilitación postquirúrgica de una reparación del asta posterior del menisco medial es imprescindible considerar los riesgos y beneficios de la acción muscular del SM, ya sea trabajando de manera analítica o estando éste integrado en el grupo de los músculos isquiosurales, y pensamos que puede ser considerada como una posible contraindicación, tal y como han sugerido alguno de los protocolos consultados [168]. Por este motivo, también consideramos necesario revisar los protocolos que describen otros autores en los cuales el trabajo de los músculos isquiosurales está incorporado sin ningún tipo de restricción, obviando las consecuencias que pueda tener sobre el menisco medial una tracción producida por el SM [21,125,168,172–174].

Por otra parte, en la literatura publicada tampoco se hace mención de manera explícita a las consecuencias que puede tener la aplicación de los estiramientos miotendinosos de la musculatura isquiosural, teniendo en cuenta que un trabajo de este tipo, ya sea mediante estiramientos activos, asistidos o pasivos, también comportaría una tracción directa sobre la zona de inserción del tendón distal del SM y, por ende y tal y como hemos demostrado, tendría una repercusión sobre el menisco medial.

Los resultados obtenidos en nuestro trabajo nos permiten argumentar que cualquier acción del SM (ya sea activa o pasiva; en cadena cinética abierta, cerrada o mixta; en amplitud de trabajo interna, externa, total o intermedia; o en forma isométrica, concéntrica o excéntrica) que implique tracción del LPO tendrá repercusiones en la cápsula articular posterior de la rodilla y en el menisco medial, por lo que este aspecto deberá ser considerado en la fase inicial de la rehabilitación postoperatoria para reparaciones del cuerno posterior del menisco medial.

De hecho, nuestro estudio propone que se considere la relación del ligamento poplíteo oblicuo con el menisco medial no solamente en los procesos postquirúrgicos de una reparación del asta posterior del menisco medial, sino que debería extrapolarse a otras lesiones meniscales de igual o mayor magnitud, como podría ser, por ejemplo, la implantación de un menisco proveniente de un banco de tejidos, tal y como ya apuntan algunos autores [163]. De igual manera, pensamos que nuestras consideraciones también pueden hacerse extensivas a intervenciones que afectan al menisco lateral y reforzamos la opinión de algunos autores que hacen referencia a la contraindicación del trabajo activo de los músculos isquiosurales en las primeras 6 semanas posteriores a una reparación del menisco lateral [175].

Por el contrario, y en contra a lo expuesto anteriormente, nuestro estudio también permite dar argumentos que respaldan que la integración de acciones producidas por o sobre el SM puede ser beneficiosa en las fases iniciales de las intervenciones mencionadas. En este sentido, teniendo en cuenta la conexión propioceptiva entre el SM y el menisco medial [53], se puede plantear que la tracción temprana de baja intensidad puede ser beneficiosa al facilitar el despertar propioceptivo después de una cirugía.

También se plantea que la aplicación de un movimiento cíclico de tracción y relajación del SM sobre la cápsula posterior de la rodilla puede traducirse en una acción de bombeo que permita facilitar el drenaje y la reabsorción de posibles hematomas y acúmulo de líquido en las estructuras anatómicas de la zona posterior de la rodilla que se hayan visto afectadas en el acto quirúrgico de la reparación meniscal.

En relación a lo anterior y como principal limitación al presente estudio está el haberlo realizado en especímenes donantes criopreservados. Esto no ha permitido poder observar en la práctica si la aplicación de un movimiento de bombeo facilita el drenaje en la zona parameniscal después de una reparación meniscal. De igual manera, también hace que sea imposible estudiar todos

aquellos aspectos relacionados con respuestas propioceptivas reales ante un estímulo concreto, como puede ser el efecto que pudiera tener la tracción del músculo semimembranoso sobre la cápsula posterior de la rodilla y sobre el menisco medial. En ambos casos, tanto si el objetivo de aplicar una tracción temprana es el de estimular el despertar propioceptivo como si es el de facilitar el drenaje postquirúrgico, hipotetizamos que la fuerza de la tracción temprana tan solo sería beneficiosa si es de baja intensidad puesto que si es de alta intensidad puede ser perjudicial para el menisco debido al riesgo de desgarro de la sutura aún no cicatrizada o para la cápsula, debido a la posibilidad de avulsiones y desgarros [39,44,55].

Otra limitación ha sido que durante la realización de nuestro estudio tampoco era posible solicitar una contracción muscular voluntaria que permitiese visualizar el comportamiento de los músculos realizando un trabajo activo durante el estudio ecográfico. Esta acción siempre aporta valor a las exploraciones ecográficas neuromusculoesqueléticas realizadas en clínica.

Aunque el estudio nos ha permitido identificar ecográficamente todas las estructuras y realizar su comprobación a partir del estudio anatómico, debe tenerse en cuenta que los resultados son de especímenes donantes, la mayoría de ellos, de edad avanzada y ello ha comportado que las estructuras anatómicas tengan evidentes signos degenerativos propios a su edad cronológica.

Por otra parte, cabe considerar que, al realizar el estudio anatómico mediante la disección, el propio acto de diseccionar una estructura implica que ésta se está invadiendo y, por ende, se están modificando sus características naturales. De este modo, para poder visualizar una estructura anatómica localizada en un plano profundo es preciso retirar previamente algunas otras más superficiales, así como los elementos de tejido conectivo existentes entre ambas.

Respecto a futuras líneas de trabajo y proyectos de estudio y con el fin de poder dar valor a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se propone continuar en esta línea de investigación y darle traslacionalidad para que pueda ser aplicada clínicamente.

A tal efecto, se considera que la realización de un ensayo clínico aleatorizado con pacientes intervenidos de una reparación del menisco medial, ya sea unicéntrico o multicéntrico, permitiría determinar si la tracción temprana del tendón distal del músculo semimembranoso sobre la cápsula posterior de la rodilla, tanto si está provocada por un estiramiento miotendinoso o por la contracción muscular activa del mismo músculo, es un aspecto beneficioso en este tipo intervenciones o si, por el contrario, podría tener efectos perjudiciales para el paciente y podría ser una de las posibles causas del fracaso de la reparación.

En el momento de diseñar estos futuros proyectos consideramos que también debería tenerse en cuenta lo descrito en nuestro trabajo respecto a las diferencias anatómicas, biomecánicas y funcionales que presentan entre ellos los músculos isquiosurales y que dan valor a aspectos como que el ST y la CCBF tienen una arquitectura diseñada para las acciones con más recorrido, mientras que el SM y la CLBF lo están para la producción de picos altos de fuerza [58], o que unos están más implicados en la flexión de la rodilla mientras que los otros lo están en la extensión de la cadera [68].

En base a los resultados obtenidos proponemos que en los protocolos de rehabilitación de una reparación meniscal del menisco medial se tenga en cuenta la acción específica del músculo semimembranoso y su relación con el menisco medial ya que en la actualidad son variados, no se tiene en cuenta las relaciones de estas estructuras anatómicas y no existe un consenso sobre cuál de ellos es el más apropiado.

6.- CONCLUSIONES

6.- CONCLUSIONES.

- 1- Existe una estrecha relación anatómica entre la inserción proximal del músculo semimembranoso y la cabeza larga del músculo bíceps femoral con el ligamento sacrotuberoso, que debe tenerse en cuenta en el diagnóstico de patologías de la zona isquiática y zona lumbar.
- 2- La inserción proximal de los músculos semimembranoso y porción larga del músculo bíceps femoral están rodeados de una expansión de tejido conectivo denso similar a un retináculo, que es posible visualizar ecográficamente.
- 3- Desde el origen de los músculos semimembranoso y porción larga del músculo bíceps femoral se origina una expansión hacia el músculo glúteo mayor que cubre y fija el nervio ciático y es visible ecográficamente.
- 4- La ecografía es un método de radiodiagnóstico muy útil para identificar la inserción proximal del músculo semimembranoso y su relación con el tendón de la cabeza larga del músculo bíceps femoral y ver posibles alteraciones del mismo.
- 5- La ecografía es un método de radiodiagnóstico muy útil para identificar las divisiones del tendón distal del músculo semimembranoso y su relación con las estructuras anatómicas adyacentes, como el ligamento colateral medial y la parte posterior de la cápsula de la rodilla.
- 6- Las fibras distales del músculo semimembranoso adoptan una disposición helicoidal que se continúa y prolonga hasta su división en los tres tendones distales principales. Esta disposición helicoidal no aparece en los fetos de entre 29 y 38 semanas de edad.
- 7- Aunque no se ha apreciado una continuidad anatómica directa entre el tendón reflejo o ligamento poplíteo oblicuo del músculo semimembranoso en su inserción capsular con los meniscos, sí se ha comprobado que la aplicación de una fuerza de tracción sobre el tendón del músculo semimembranoso tiene una repercusión indirecta sobre el menisco medial, debido a la transmisión de la fuerza de tracción a través de la cápsula posterior de la rodilla,

aspecto que debería ser considerado en las primeras fases de la rehabilitación postquirúrgica de algunas lesiones meniscales.

7.- BIBLIOGRAFÍA

7.- BIBLIOGRAFÍA

1. Llusá M, Merí À, Ruano D. Manual y atlas fotográfico de anatomía del aparato locomotor. 1ª ed. Madrid: Médica Panamericana; 2004; 303-387.
2. Lippert herbet. Anatomía con orientación clínica para estudiantes. 5ª ed. Madrid: Marbán; 1996; 868-891.
3. Lorente M, Miguel M, Pérez A EC. Manual de miología. 1ª ed. Barcelona: Elsevier Doyma, S.L.; 2007; 224-263.
4. Strandring S. Gray's Anatomy: The Anatomical Basis of Clinical Practice. 41ª ed. Londres: Elsevier; 2016; 1337-1399.
5. Woodley SJ, Mercer SR. Hamstring muscles: Architecture and innervation. Cells Tissues Organs. 2005;179(3):125-141.
6. Huygaerts S, Cos F, Cohen DD, Calleja-González J, Pruna R, Alcaraz PE, et al. Does Muscle-Tendon Unit Structure Predispose to Hamstring Strain Injury During Running? A Critical Review. Sport Med. 2021;51(2):215-224.
7. Beltran L, Ghazikhanian V, Padron M, Beltran J. The proximal hamstring muscle-tendon-bone unit: A review of the normal anatomy, biomechanics, and pathophysiology. Eur J Radiol. 2012;81(12):3772-3779.
8. Neuschwander TB, Benke MT, Gerhardt MB. Anatomic description of the origin of the proximal hamstring. Arthrosc - J Arthrosc Relat Surg. 2015;31(8):1518-1521.
9. Stępień K, Śmigielski R, Mouton C, Cizek B, Engelhardt M, Seil R. Anatomy of proximal attachment, course, and innervation of hamstring muscles: a pictorial essay. Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc. 2019;27(3):673-684.
10. Sato K, Nimura A, Yamaguchi K, Akita K. Anatomical study of the proximal origin of hamstring muscles. J Orthop Sci. 2012;17(5):614-618.
11. De Maeseneer M, Shahabpour M, Lenchik L, Milants A, De Ridder F, De Mey J, et al. Distal insertions of the semimembranosus tendon: MR imaging with anatomic correlation. Skeletal Radiol. 2014;43(6):781-791.
12. Beltran J, Matityahu A, Hwang K, Jbara M, Maimon R, Padron M, et al. The distal semimembranosus complex: Normal MR anatomy, variants, biomechanics and pathology. Skeletal Radiology. 2003;32:435-445.
13. Geiger D, Chang E, Pathria M, Chung CB. Posterolateral and Posteromedial Corner Injuries of the Knee. Radiol Clin North Am. 2013;51(3):413-432.
14. Robinson JR, Sanchez-Ballester J, Bull AMJ, Thomas R de WM, Amis AA. The posteromedial corner revisited. An anatomical description of the passive restraining structures of the medial aspect of the human knee. J Bone Jt Surg - Ser B. 2004;86(5):674-681.
15. Stone JM, Gordon DH. MRI of an Accessory Semimembranosus Muscle. Journal of Computer Assisted Tomography. 1995;19:161-162.
16. Cattrysse E, Barbaix E, Janssens V, Alewaeters K, Van Roy P CJ. Observation of a supernumerary hamstring muscle: a state of the art on its incidence and clinical relevance. Morphologie. 2002;86 (274):17-21.
17. Philippon MJ, Ferro FP, Campbell KJ, Michalski MP, Goldsmith MT, Devitt BM, et al. A qualitative and quantitative analysis of the attachment sites of the proximal hamstrings. Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc. 2015;23(9):2554-2561.
18. Azzopardi C, Almeer G, Kho J, Beale D, James SL, Botchu R. Hamstring origin-anatomy, angle of origin and its possible clinical implications. J Clin Orthop Trauma. 2021;13:50-52.
19. Miller SL, Webb GR. The proximal origin of the hamstrings and surrounding anatomy encountered during repair. J Bone Jt Surg. 2008;90(2):108-116.
20. Linklater JM, Hamilton B, Carmichael J, Orchard J, Wood DG. Hamstring injuries:

21. Anatomy, imaging, and intervention. *Semin Musculoskelet Radiol.* 2010;14(2):131-161.
22. Tang J, Ji M, Liao YM, Cheng ZY, Chen L, Zhan FB, et al. Arthroscopic all-inside suture repair combined with sodium hyaluronate injection for discoid meniscus injury. *Chinese Journal of Tissue Engineering Research.* 2015;19:5943-5949.
23. Becciolini M, Bonacchi G, Bianchi S. Ultrasound features of the proximal hamstring muscle-tendon-bone unit. *J Ultrasound Med.* 2019;38(5):1367-1382.
24. Kellis E. Intra- and Inter-Muscular Variations in Hamstring Architecture and Mechanics and Their Implications for Injury: A Narrative Review. *Sport Med.* 2018;48(10):2271-2283.
25. van der Made AD, Wieldraaijer T, Kerkhoffs GM, Kleipool RP, Engebretsen L, van Dijk CN, et al. The hamstring muscle complex. *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc.* 2015;23(7):2115-2122.
26. Laskovski JR, Kahn AJ, Urchek RJ, Guanche CA. Endoscopic Proximal Hamstring Repair and Ischial Bursectomy Using Modified Portal Placement and Patient Positioning. *Arthrosc Tech.* 2018;7(11):1071-1078.
27. Koulouris G, Connell D. Hamstring muscle complex: An imaging review. *Radiographics.* Radiological Society of North America Inc. 2005; 25:571-586.
28. Sallay PI, Friedman RL, Coogan PG, Garrett WE. Hamstring muscle injuries among water skiers: Functional outcome and prevention. *Am J Sports Med.* 1996;24(2):130-136.
29. Feucht MJ, Plath JE, Seppel G, Hinterwimmer S, Imhoff AB, Brucker PU. Gross anatomical and dimensional characteristics of the proximal hamstring origin. *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc.* 2015;23(9):2576-2582.
30. Dierckman BD, Guanche CA. Endoscopic Proximal Hamstring Repair and Ischial Bursectomy. *Arthrosc Tech.* 2012;1(2):201-207.
31. Miller BSL, Gill J, Webb GR. The proximal origin of the hamstrings and surrounding anatomy encountered during repair. A cadaveric study. *J Bone Jt Surg.* 2007;89(805):44-48.
32. Martin BF. The origins of the hamstring muscles. *J Anat.* 1968;102(2):345-352.
33. Lempainen L, Kosola J, Pruna R, Sinikumpu JJ, Valle X, Heinonen O, et al. Tears of biceps femoris, semimembranosus, and semitendinosus are not equal. A new individual muscle-tendon concept in athletes. *Scand J Surg.* 2021;110(4):483-491.
34. Storey RN, Meikle GR, Stringer MD, Woodley SJ. Proximal hamstring morphology and morphometry in men: an anatomic and MRI investigation. *Scand J Med Sci Sport.* 2016;26(12):1480-1489.
35. Timmins Ryan, Woodley Stephanie, Shield Anthony OD. Anatomy of the hamstrings. En: *Prevention and Rehabilitation of Hamstring Injuries.* Springer; 2020:1-30.
36. Benninger B, Delamarter T. Distal semimembranosus muscle-tendon-unit review: morphology, accurate terminology, and clinical relevance. *Folia Morphol (Warsz).* 2013;72(1):1-9.
37. Pedersen RR. The Medial and Posteromedial Ligamentous and Capsular Structures of the Knee: Review of Anatomy and Relevant Imaging Findings. En: *Seminars in Musculoskeletal Radiology.* Thieme Medical Publishers, Inc.; 2016;12-25.
38. Vieira TD, Pioger C, Frank F, Saithna A, Cavaignac E, Thaumat M, et al. Arthroscopic Dissection of the Distal Semimembranosus Tendon: An Anatomical Perspective on Posteromedial Instability and Ramp Lesions. *Arthrosc Tech.* 2019;8(9):e987-991.
39. Sims WF, Jacobson KE. The Posteromedial Corner of the Knee: Medial-Sided Injury Patterns Revisited. *Am J Sports Med.* 2004;32(2):337-345.
40. Lundquist RB, Matcuk GR, Schein AJ, Skalski MR, White EA, Forrester DM, et al. Posteromedial corner of the knee: The neglected corner. *Radiographics.* 2015;35(4):1123-1137.
41. Flandry F, Hommel G. Normal anatomy and biomechanics of the knee. *Sports Med Arthrosc.* 2011;19(2):82-92.

41. Kim YC, Yoo WK, Chung IH, Seo JS, Tanaka S. Tendinous insertion of semimembranosus muscle into the lateral meniscus. *Surg Radiol Anat.* 1998;19(6):365-369.
42. LaPrade RF, Morgan PM, Wentorf FA, Johansen S, Engebretsen L. The anatomy of the posterior aspect of the knee: An anatomic study. *J Bone Jt Surg.* 2007;89(4):758-764.
43. Benninger B, Delamarter T. The "Oblique Popliteal Ligament": A Macro and Microanalysis to Determine If It Is a Ligament or a Tendon. *Anat Res Int.* 2012;1-7.
44. Cavaignac E, Sylvie R, Teulières M, Fernandez A, Frosch KH, Gomez-Bouchet A, et al. What Is the Relationship Between the Distal Semimembranosus Tendon and the Medial Meniscus? A Gross and Microscopic Analysis From the SANTI Study Group. *Am J Sports Med.* 2021;49(2):459-466.
45. Nakamura T, Suzuki D, Murakami G, Cho BH, Fujimiya M, Kozuka N. Human fetal anatomy of the posterior semimembranosus complex at the knee with special reference to the gastrocnemio-semimembranosus bursa. *Knee.* 2011;18(4):271-277.
46. Jin ZW, Abe H, Jin Y, Shibata S, Murakami G, Rodríguez-Vázquez JF. Positional changes in tendon insertions from bone to fascia: Development of the pes anserinus and semimembranosus muscle insertion in human foetuses. *Folia Morphol.* 2016;75(4):503-511.
47. Koulouris G, Connell D. Evaluation of the hamstring muscle complex following acute injury. *Skeletal Radiol.* 2003;32(10):582-589.
48. Rothstein CP, Laorr A, Helms CA, Tirman PFJ. Semimembranosus-tibial collateral ligament bursitis: MR imaging findings. *Am J Roentgenol.* 1996;166(4):875-877.
49. Hennigan, S P; Schneck, C D; Mesgarzadeh, M; Clancy M. The semimembranosus-tibial collateral ligament bursa. Anatomical study and magnetic resonance imaging. *J Bone Jt Surg.* 1994;76(9):1322-1327.
50. Balias R, Pedret C, Iriarte I, Sáiz R, Cerezal L. Sonographic landmarks in hamstring muscles. *Skeletal Radiol.* 2019;48(11):1675-1683.
51. De Maeseneer M, Marcelis S, Boulet C, Kichouh M, Shahabpour M, De Mey J, et al. Ultrasound of the knee with emphasis on the detailed anatomy of anterior, medial, and lateral structures. *Skeletal Radiol.* 2014;43(8):1025-1039.
52. Laprade MD, Kennedy MI, Wijdicks CA, Laprade RF. Anatomy and Biomechanics of the Medial Side of the Knee and Their Surgical Implications. 2015;23(2):63-70.
53. Saygi B, Yildirim Y, Berker N, Ofluoglu D, Karadag-Saygi E, Karahan M. Evaluation of the neurosensory function of the medial meniscus in humans. *Arthrosc - J Arthrosc Relat Surg.* 2005;21(12):1468-1472.
54. Busquet L. Las cadenas musculares. Miembros inferiores. 5º ed. Barcelona: Paidotribo; 2004; 69-119.
55. Khoshnoodi P, Tehranzadeh AD, Dunn JM, Tehranzadeh J. Semimembranosus tendon avulsion fracture of the posteromedial tibial plateau associated with posterior cruciate ligament tear and capsular rupture. *Skeletal Radiol.* 2014;43(2):239-242.
56. Bylund WE, de Weber K. Semimembranosus tendinopathy: One cause of chronic posteromedial knee pain. *Sports Health.* 2010;2(5):380-384.
57. Peterson JE, Currarino G. Unilateral absence of thigh muscles confirmed by CT scan. *Pediatr Radiol.* 1981;11(3):157-159.
58. Kellis E, Galanis N, Kapetanios G, Natsis K. Architectural differences between the hamstring muscles. *J Electromyogr Kinesiol.* 2012;22(4):520-526.
59. Prose, L.P., C.M.C. Ten Noever De Brow, P.C. Delis GJDB. The semimembranosus muscle . The architecture, innervation and insertions. *Eur J Morphol.* 1990;28:93-94.
60. Kapandji I. Cuadernos de fisiología articular. Miembro inferior. 2a ed. Barcelona: Toray-Masson; 1974. 50-135.
61. Kapandji I. Cuadernos de fisiología articular. Tronco y raquis. 1a ed. Barcelona: Toray-

- Masson; 1973; 110-116.
62. Busquet L. Las cadenas musculares. Lordosis, cifosis, escoliosis y deformaciones torácicas. 7ª ed. Barcelona: Paidotribo; 2005; 71-121.
63. Calais-Germain B. Anatomía para el movimiento. Saint-Étienne: Dumas; 1991. 208-255.
64. Thelen DG, Lenz AL, Francis C, Lenhart RL, Hernández A. Empirical assessment of dynamic hamstring function during human walking. *J Biomech*. 2013;46(7):1255-1261.
65. van Wingerden JP, Vleeming A, Snijders CJ, Stoeckart R. A functional-anatomical approach to the spine-pelvis mechanism: interaction between the biceps femoris muscle and the sacrotuberous ligament. *Eur Spine J*. 1993;2(3):140-144.
66. Hennessey L, Watson AW. Flexibility and posture assessment in relation to hamstring injury. *Br J Sports Med*. 1993;27(4):243-246.
67. Franz JR, Paylo KW, Dicharry J, Riley PO, Kerrigan DC. Changes in the coordination of hip and pelvis kinematics with mode of locomotion. *Gait Posture*. 2009;29(3):494-498.
68. Arner JW, McClincy MP, Bradley JP. Hamstring Injuries in Athletes: Evidence-based Treatment. *J Am Acad Orthop Surg*. 2019;27(23):868-877.
69. Cugat R. Patología de los ligamentos de la rodilla del futbolista. Barcelona: Libergraf, SL; 1996; 24-41.
70. Guelich DR, Xu D, Koh JL, Nuber GW, Zhang LQ. Different roles of the medial and lateral hamstrings in unloading the anterior cruciate ligament. *Knee*. 2016;23(1):97-101.
71. Lieber RL, Fridén J. Functional and Clinical Significance of skeletal muscle architecture. *Muscle Nerve*. 2000;23:1647-1666.
72. Blazeovich AJ, Gill ND, Zhou S. Intra- and intermuscular variation in human quadriceps femoris architecture assessed in vivo. *J Anat*. 2006;209(3):289-310.
73. Chahla J, Kunze KN, LaPrade RF, Getgood A, Cohen M, Gelber P, et al. The posteromedial corner of the knee: an international expert consensus statement on diagnosis, classification, treatment, and rehabilitation. *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc*. 2021;29(9):2976-2986.
74. Chahal J, Al-Taki M, Pearce D, Leibenberg A, Whelan DB. Injury patterns to the posteromedial corner of the knee in high-grade multiligament knee injuries: A MRI study. *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc*. 2010;18(8):1098-1104.
75. Lundquist RB, Matcuk GR, Schein AJ, Skalski MR, White EA, Forrester DM, et al. Posteromedial corner of the knee: The neglected corner. *Radiographics*. 2015;35(4):1123-1137.
76. House C V., Connell DA, Saifuddin A. Posteromedial corner injuries of the knee. *Clin Radiol*. 2007;62(6):539-546.
77. Bae BS, Yoo S, Lee SH. Ramp lesion in anterior cruciate ligament injury: a review of the anatomy, biomechanics, epidemiology, and diagnosis. *Knee Surg Relat Res*. 2023;35(1):1-12.
78. Widodo AF, Tien CW, Chen CW, Lai SC. Isotonic and Isometric Exercise Interventions Improve the Hamstring Muscles' Strength and Flexibility: A Narrative Review. *Healthc*. 2022;10(5):1-10.
79. Griffith CJ, Wijdicks CA, LaPrade RF, Armitage BM, Johansen S, Engebretsen L. Force measurements on the posterior oblique ligament and superficial medial collateral ligament proximal and distal divisions to applied loads. *Am J Sports Med*. 2009;37(1):140-148.
80. Wijdicks CA, Griffith CJ, Johansen S, Engebretsen L, LaPrade RF. Injuries to the medial collateral ligament and associated medial structures of the knee. *J Bone Jt Surg*. 2010;92(5):1266-1280.
81. Morgan PM, Laprade RF, Wentorf FA, Cook JW, Bianco A. The Role of the Oblique Popliteal Ligament and Other Structures in Preventing Knee Hyperextension. *Am J Sports Med*. 2010;38(3):550-557.

82. Petersen W, Loerch S, Schanz S, Raschke M, Zantop T. The role of the posterior oblique ligament in controlling posterior tibial translation in the posterior cruciate ligament-deficient knee. *Am J Sports Med.* 2008;36(3):495-501.
83. Mauch M, Nüesch C, Bühl L, Chocholac T, Mündermann A, Stoffel K. Reconstruction of proximal hamstring ruptures restores joint biomechanics during various walking conditions. *HIP Int.* 2024;34(4):516-523.
84. Zhong Y, Fu W, Wei S, Li Q, Liu Y. Joint Torque and Mechanical Power of Lower Extremity and Its Relevance to Hamstring Strain during Sprint Running. *J Healthc Eng.* 2017;20(17):892-927.
85. Sun Y, Wei S, Zhong Y, Fu W, Li L, Liu Y. How joint torques affect hamstring injury risk in sprinting swing-stance transition. *Med Sci Sports Exerc.* 2015;47(2):373-380.
86. Schache AG, Dorn TW, Blanch PD, Brown NAT, Pandy MG. Mechanics of the human hamstring muscles during sprinting. *Med Sci Sports Exerc.* 2012;44(4):647-658.
87. Tillaar R Van Den, Asmund J, Solheim B. Comparison of Hamstring Muscle Activation During High-Speed Running and Various Hamstring Strengthening Exercises. *Int J Sports Phys Ther.* 2017;12(5):718-727.
88. Hansen C, Einarson E, Thomson A, Whiteley R. Peak medial (but not lateral) hamstring activity is significantly lower during stance phase of running. An EMG investigation using a reduced gravity treadmill. *Gait Posture.* 2017;57:7-10.
89. Higashihara A, Nagano Y, Ono T, Fukubayashi T. Differences in hamstring activation characteristics between the acceleration and maximum-speed phases of sprinting. *J Sports Sci.* 2018;36(12):1313-1318.
90. Thelen DG, Chumanov ES, Best TM, Swanson SC, Heiderscheit BC. Simulation of biceps femoris musculotendon mechanics during the swing phase of sprinting. *Med Sci Sports Exerc.* 2005;37(11):1931-1938.
91. Hazle CR. Case report of atypical bilateral posteromedial knee instability in a male recreational runner. *Physiother Theory Pract.* 2011;27(2):160-171.
92. Warren LF, Marshall JL. The supporting structures and layers on the medial side of the knee: an anatomical analysis. *J Bone Joint Surg Am.* 1979;61(1):56-62.
93. Wijdicks CA, Griffith CJ, LaPrade RF, Spiridonov SI, Johansen S, Armitage BM, et al. Medial knee injury: Part 2, load sharing between the posterior oblique ligament and superficial medial collateral ligament. *Am J Sports Med.* 2009;37(9):1771-1776.
94. HUGHSTON, JACK C.; EILERS AF. The Role of the Posterior Oblique Ligament in Repairs of Acute Medial (Collateral) Ligament Tears of the Knee. *J Bone Jt Surg.* 1973;55:923-940.
95. Ernlund L, Vieira L de A. Hamstring injuries: update article. *Rev Bras Ortop (English Ed.* junio de 2017;52(4):373-382.
96. Danielsson A, Horvath A, Senorski C, Alentorn-Geli E, Garrett WE, Cugat R, et al. The mechanism of hamstring injuries- A systematic review. *BMC Musculoskelet Disord.* 2020;21(1):1-21.
97. Ahmad CS, Redler LH, Ciccotti MG, Maffulli N, Longo UG, Bradley J. Evaluation and management of hamstring injuries. *Am J Sports Med.* 2013;41(12):2933-2947.
98. Kuske B, Hamilton DF, Pattle SB, Simpson HARW. Patterns of hamstring muscle tears in the general population: A systematic review. *PLoS One.* 2016;11(5):1-12.
99. Thomopoulos S, Parks WC, Rifkin DB, Derwin KA. Mechanisms of tendon injury and repair. *J Orthop Res.* 2015;33(6):832-839.
100. De Smet AA, Best TM. MR imaging of the distribution and location of acute hamstring injuries in athletes. *Am J Roentgenol.* 2000;174(2):393-399.
101. Farfán E, Rojas S, Olivé-Vilás R, Rodríguez-Baeza A. Morphological study on the origin of the semitendinosus muscle in the long head of biceps femoris. *Scand J Med Sci Sport.*

- 2021;31(12):2282-2290.
102. Askling CM, Tengvar M, Saartok T, Thorstensson A. Acute first-time hamstring strains during slow-speed stretching: Clinical, magnetic resonance imaging, and recovery characteristics. *Am J Sports Med.* 2007;35(10):1716-1724.
 103. Jakobsen JR, Mackey AL, Knudsen AB, Koch M, Kjær M, Krogsgaard MR. Composition and adaptation of human myotendinous junction and neighboring muscle fibers to heavy resistance training. *Scand J Med Sci Sport.* 2017;27(12):1547-1559.
 104. Wangenstein A, Tol JL, Roemer FW, Bahr R, Dijkstra HP, Crema MD, et al. Intra- and interrater reliability of three different MRI grading and classification systems after acute hamstring injuries. *Eur J Radiol.* 2017;89:182-190.
 105. Beatty NR, Félix I, Hettler J, Moley PJ, Wyss JF. Rehabilitation and prevention of proximal hamstring tendinopathy. *Curr Sports Med Rep.* 2017;16(3):162-171.
 106. Geraci MC. Overuse injuries of the hip and pelvis. *J Back Musculoskelet Rehabil.* 1996;6(1):5-19.
 107. Woods C, Hawkins RD, Maltby S, Hulse M, Thomas A, Hodson A. The Football Association Medical Research Programme: An audit of injuries in professional football - Analysis of hamstring injuries. *Br J Sports Med.* 2004;38(1):36-41.
 108. Kiapour AM, Murray MM. Basic science of anterior cruciate ligament injury and repair. *Bone Jt Res.* 2014;3(2):20-31.
 109. Bühl L, Müller S, Nüesch C, Boyer KA, Casto E, Mündermann A, et al. Ambulatory knee biomechanics and muscle activity 2 years after ACL surgery: InternalBrace™-augmented ACL repair versus ACL reconstruction versus healthy controls. *BMC Musculoskelet Disord.* 2023;24(1):1-14.
 110. Beynnon BD, Fleming BC. Anterior cruciate ligament strain in-vivo: a review of previous work. *Journal of biomechanics.* 1998;31(6):519-525.
 111. Fleming BC, Renstrom PA, Ohlen G, Johnson RJ, Peura GD, Beynnon BD, et al. The gastrocnemius muscle is an antagonist of the anterior cruciate ligament. *J Orthop Res.* 2001;19(6):1178-1184.
 112. Pandy MG, Shelburne KB. Dependence of cruciate-ligament loading on muscle forces and external load. *J Biomech.* 1997;30(10):1015-1024.
 113. Oh YK, Kreinbrink JL, Wojtys EM, Ashton-Miller JA. Effect of axial tibial torque direction on ACL relative strain and strain rate in an in vitro simulated pivot landing. *J Orthop Res.* 2012;30(4):528-534.
 114. Yasuda K, Ichiyama H, Kondo E, Miyatake S, Inoue M, Tanabe Y. An In Vivo Biomechanical Study on the Tension-Versus-Knee Flexion Angle Curves of 2 Grafts in Anatomic Double-Bundle Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Effects of Initial Tension and Internal Tibial Rotation. *Arthrosc - J Arthrosc Relat Surg.* 2008;24(3):276-284.
 115. Keith L, Markolf, Daniel M. Burchfield, Matthew M. Shapiro, Michael F. Shepard, Gerald A. M. Finerman, James LS. Combined Knee Loading States that Generate High Anterior Cruciate Ligament Forces Keith. *J Orthop Res.* 1995;13:930-935.
 116. Shin CS, Chaudhari AM, Andriacchi TP. Valgus plus internal rotation moments increase anterior cruciate ligament strain more than either alone. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43(8):1484-1491.
 117. Bryant JT, Cooke TDV. Standardized biomechanical measurement for varus-valgus stiffness and rotation in normal knees. *J Orthop Res.* 1988;6(6):863-870.
 118. Maniar N, Cole MH, Bryant AL, Opar DA. Muscle Force Contributions to Anterior Cruciate Ligament Loading. *Sport Med.* 2022;52(8):1737-1750.
 119. Ueno R, Navacchia A, Schilaty ND, Myer GD, Hewett TE, Bates NA. Hamstrings Contraction Regulates the Magnitude and Timing of the Peak ACL Loading During the Drop Vertical Jump in Female Athletes. *Orthop J Sport Med.* 2021;9(9):1-8.

120. Fujiya H, Kousa P, Fleming BC, Churchill DL, Beynnon BD. Effect of muscle loads and torque applied to the tibia on the strain behavior of the anterior cruciate ligament: An in vitro investigation. *Clin Biomech.* 2011;26(10):1005-1011.
121. Lephart SM, Abt JP, Ferris CM. Neuromuscular contributions to anterior cruciate ligament injuries in females. 2002; 14(2):168-173.
122. Seil R, Mouton C, Coquay J, Hoffmann A, Nührenbörger C, Pape D, et al. Ramp lesions associated with ACL injuries are more likely to be present in contact injuries and complete ACL tears. *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc.* 2018;26(4):1080-1085.
123. Papageorgiou CD, Gil JE, Kanamori A, Fenwick JA, Woo SLY, Fu FH. The biomechanical interdependence between the anterior cruciate ligament replacement graft and the medial meniscus. *Am J Sports Med.* 2001;29(2):226-231.
124. KAPLAN EB. Some aspects of functional anatomy of the human knee joint. *Clin Orthop.* 1962;23:18-29.
125. Malinowski K, Ebisz M, Góralczyk A, LaPrade RF, Hermanowicz K. You Can Repair More Tears Than You Think. Tricks for All-Inside Lateral Meniscal Repair With Nonabsorbable Sutures. *Arthrosc Tech.* 2020;9(7):e979-86.
126. Tiftikçi U, Serbest S. Does the location of placement of meniscal sutures have a clinical effect in the all-inside repair of meniscocapsular tears? *J Orthop Surg Res.* 2017;12(1):87.
127. Bąkowski P, Bąkowska-Zdot;Ywicka K, Piontek T. Clinical practice and postoperative rehabilitation after knee arthroscopy vary according to surgeons' expertise: A survey among polish arthroscopy society members. *BMC Musculoskeletal Disorders.* BioMed Central Ltd; 2020; 21(1):626.
128. Arroquy D, Olivetto J, Chahla J, Orlowski MB, Vilaseca T, Guiñazu J, et al. Sutura Meniscal. *Técnicas Quirúrgicas.Revista de Artroscopía.* 2015;22(3):78-84.
129. DePhillipo NN, Moatshe G, Chahla J, Aman ZS, Storaci HW, Morris ER, et al. Quantitative and Qualitative Assessment of the Posterior Medial Meniscus Anatomy: Defining Meniscal Ramp Lesions. *Am J Sports Med.* 2019;47(2):372-378.
130. Negrín R, Reyes NO, Iñiguez M, Pellegrini JJ, Wainer M, Duboy J. Meniscal Ramp Lesion Repair Using an All-Inside Technique. *Arthrosc Tech.* 2018;7(3):e265-270.
131. Liu X, Feng H, Zhang H, Hong L, Wang XS, Zhang J. Arthroscopic prevalence of ramp lesion in 868 patients with anterior cruciate ligament injury. *Am J Sports Med.* 2011;39(4):832-837.
132. Thaunat M, Ingale P, Penet A, Kacem S, Haidar I, Bauwens PH, et al. Ramp Lesion Subtypes: Prevalence, Imaging, and Arthroscopic Findings in 2156 Anterior Cruciate Ligament Reconstructions. *Am J Sports Med.* 2021;49(7):1813-1821.
133. Seitz AM, Lubomierski A, Friemert B, Ignatius A, Dürselen L. Effect of partial meniscectomy at the medial posterior horn on tibiofemoral contact mechanics and meniscal hoop strains in human knees. *J Orthop Res.* 2012;30(6):934-942.
134. López XP, Tey Pons M, Reina de la Torre F, Verdier LP, Alier Fabregó A, Pavlovich RI, Monllau García JC. Study of the feasibility of lateral meniscal repair including the popliteal tendon with a knee simulator. *Acta Ortop Mex.* 2010 May-Jun;24(3):182-186.
135. Kato J, Fukushima H, Hanaki S, Kawanishi Y, Kobayashi M, Ota K, et al. Efficacy of all-inside devices in reducing gap and step-off in knee extension for ramp lesion repair: A cadaveric study. *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc.* 2024; 32(2):257-264.
136. Waddell G, Somerville D, Henderson L, Newton M. Objective clinical evaluation of physical impairment in chronic low back pain. *Spine.* 1992; 17:617-628.
137. Deyo RA, Phillips WR. Low back pain: A primary care challenge. *Spine.* 1996; 21:2826-2832.
138. Burton AK, Balagué F, Cardon G, Eriksen HR, Henrotin Y, Lahad A, et al. European guidelines for prevention in low back pain. *Eur Spine J.* 2006;15(2):136-168.

139. Halbertsma JPK, Göeken LNH, Hof AL, Groothoff JW, Eisma WH. Extensibility and stiffness of the hamstrings in patients with nonspecific low back pain. *Arch Phys Med Rehabil.* 2001;82(2):232-238.
140. Radwan A, Bigney KA, Buonomo HN, Jarmak MW, Moats SM, Ross JK, et al. Evaluation of intra-subject difference in hamstring flexibility in patients with low back pain: An exploratory study. *J Back Musculoskelet Rehabil.* 2015;28(1):61-66.
141. Li Y, McClure PW, Pratt N. The effect of hamstring muscle stretching on standing posture and on lumbar and hip motions during forward bending. *Phys Ther.* 1996;76(8):836-849.
142. Shamsi MB, Mirzaei M, Shahsavari S, Safari A, Saeb M. Modeling the effect of static stretching and strengthening exercise in lengthened position on balance in low back pain subject with shortened hamstring: a randomized controlled clinical trial. *BMC Musculoskelet Disord.* 2020;21(1):1-9.
143. Prabakaran S. Comparison of Three Different Physiotherapeutic Interventions in Improving International Journal of Health Sciences and Research. 2016;
144. Moon JH, Jung JH, Won YS, Cho HY. Immediate effects of Graston Technique on hamstring muscle extensibility and pain intensity in patients with nonspecific low back pain. *J Phys Ther Sci.* 2017;29(2):224-227.
145. Fasuyi FO, Fabunmi AA, Adegoke BOA. Hamstring muscle length and pelvic tilt range among individuals with and without low back pain. *J Bodyw Mov Ther.* 2017;21(2):246-250.
146. Schache AG, Blanch P, Rath D, Wrigley T, Bennell K. Running Lumbal Kinematic.Pdf. *Hum Mov Sci.* 2002;21:273-293.
147. Mortazavi J, Zebardast J, Mirzashahi B. Low back pain in athletes. *Asian J Sports Med.* 2015;6(2):1-8.
148. Karamursel S, Snijders CJ. An integrated therapy for peripartum pelvic instability: A study of the biomechanical effects of pelvic belts. *Am J Obstet Gynecol.* 1992;166(4):1243-7.
149. Simonsen EB. Contributions to the understanding of gait control. *Dan Med J.* 2014;61(4):1-23.
150. Saikku K, Vasenius J, Saar P. Entrapment of the proximal sciatic nerve by the hamstring tendons. *Acta Orthop Belg.* 2010;76(3):321-324.
151. Young IJ, Van Riet RP, Bell SN. Surgical release for proximal hamstring syndrome. *Am J Sports Med.* 2008;36(12):2372-2378.
152. Puranen J, Orava S. The hamstring syndrome--a new gluteal sciatica. *Ann Chir Gynaecol.* 1991;80(2):212-214.
153. Zissen MH, Wallace G, Stevens KJ, Fredericson M, Beaulieu CF. High hamstring tendinopathy: MRI and ultrasound imaging and therapeutic efficacy of percutaneous corticosteroid injection. *Am J Roentgenol.* 2010;195(4):993-998.
154. Yoon MA, Choi JY, Lim HK, Yoo HJ, Hong SH, Choi JA, et al. High prevalence of abnormal MR findings of the distal semimembranosus tendon: Contributing factors based on demographic, radiographic, and MR features. *Am J Roentgenol.* 2014;202(5):1087-1093.
155. Haberfehlner H, Maas H, Harlaar J, Becher JG, Buizer AI, Jaspers RT. Freehand three-dimensional ultrasound to assess semitendinosus muscle morphology. *J Anat.* 2016;229(4):591-599.
156. Kellis E, Galanis N, Natsis K, Kapetanios G. Validity of architectural properties of the hamstring muscles: Correlation of ultrasound findings with cadaveric dissection. *J Biomech.* 2009;42(15):2549-2554.
157. Bengtzen RR, Ma OJ, Herzka A. Point-of-Care Ultrasound Diagnosis of Proximal Hamstring Rupture. *J Emerg Med.* 2018;54(2):225-228.
158. Farfán EC, Urbina DP, Uribe J V., Ferreira GA, Inzunza OH, Riveros A V. Hamstring

- Muscles. Analysis of its Use and Proposal for Inclusion in Terminologia Anatomica. *Int J Morphol*. 2024;42(3):837-842.
159. Pérez-Bellmunt A, Miguel-Pérez M, Brugué MB, Cabús JB, Casals M, Martinoli C, et al. An anatomical and histological study of the structures surrounding the proximal attachment of the hamstring muscles. *Man Ther*. 2015;20(3):445-450.
 160. Mackey AL, Heinemeier KM, Koskinen SOA, Kjaer M. Dynamic adaptation of tendon and muscle connective tissue to mechanical loading. *Connect Tissue Res*. mayo de 2008;49(3-4):165-168.
 161. Rot-Nikcevic I, Reddy T, Downing KJ, Belliveau AC, Hallgrímsson B, Hall BK, et al. Myf5-/-:MyoD-/- amyogenic fetuses reveal the importance of early contraction and static loading by striated muscle in mouse skeletogenesis. *Dev Genes Evol*. 2006;216(1):1-9.
 162. Yamaguchi Y, Kodama R, Yamada S. Morphogenetic progression of thigh and lower leg muscles during human embryonic development. *Anat Rec*. 2023;306(8):2072-2080.
 163. Fritz JM, Irrgang JJ, Harner CD. Rehabilitation following allograft meniscal transplantation: A review of the literature and case study. *J Orthop Sports Phys Ther*. 1996;24(2):98-106.
 164. Vaquero-Picado A, Rodríguez-Merchán EC. Arthroscopic repair of the meniscus: Surgical management and clinical outcomes. *EFORT Open Rev*. 2018;3(11):584-594.
 165. Mull C, Wohlmuth P, Krause M, Alm L, Kling H, Schilling AF, et al. Hepatocyte growth factor and matrix metalloprotease 2 levels in synovial fluid of the knee joint are correlated with clinical outcome of meniscal repair. *Knee*. 2020;27(4):1143-1150.
 166. Peterson J, Paschos NK, Richmond JC. Inside-Out Meniscal Repair in the Mid One-Third of the Menisci. *Oper Tech Sports Med*. 2018;26(4):256-262.
 167. Perkins B, Gronbeck KR, Yue RA, Tompkins MA. Similar failure rate in immediate post-operative weight bearing versus protected weight bearing following meniscal repair on peripheral, vertical meniscal tears. *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc*. de 2018;26(8):2245-2250.
 168. Dean RS, DePhillipo NN, Monson JK, LaPrade RF. Peripheral Stabilization Suture to Address Meniscal Extrusion in a Revision Meniscal Root Repair: Surgical Technique and Rehabilitation Protocol. *Arthrosc Tech*. 2020;9(8):e1211-1218.
 169. Alessio-Mazzola M, Lovisolo S, Capello AG, Zanirato A, Chiarlone F, Formica M, et al. Management of ramp lesions of the knee: a systematic review of the literature. Vol. 104, *Musculoskeletal Surgery*. Springer-Verlag Italia s.r.l.; 2020:125-133.
 170. Jan N, Sonnery-Cottet B, Fayard JM, Kajetanek C, Thaumat M. Complications in posteromedial arthroscopic suture of the medial meniscus. *Orthop Traumatol Surg Res*. 2016;102(8):287-293.
 171. Spang RC, Nasr MC, Mohamadi A, Deangelis JP, Nazarian A, Ramappa AJ. Rehabilitation following meniscal repair: A systematic review. *BMJ Open Sport and Exercise Medicine*. BMJ Publishing Group. 2018;4.
 172. Moyer JA, Handling KA. The Arthroscopic Meniscal Repair: Recognition, Treatment, and Rehabilitation. A Functional Approach. *Sport Med Train Rehabil*. 1989;1(3):181-190.
 173. Oravitan M, Avram C. The effectiveness of electromyographic biofeedback as part of a meniscal repair rehabilitation programme. *J Sport Sci Med*. 2013;12(3):526-532.
 174. Watson FJ, Arciero RA. Inside-out meniscus repair. *Oper Tech Sports Med*. 2003;11(2):104-126.
 175. Bizzini M, Gorelick M, Drobny T. Lateral meniscus repair in a professional ice Hockey goaltender: A case report with a 5-year follow-up. *J Orthop Sports Phys Ther*. 2006;36(2):89-100.