Revista Académica Internacional de Educación Física
Volumen 6, Número 6, pp 20-33, 2025 ISSN: 2745-1887

Relación entre ángulo de penación y calidad muscular en diferentes grupos etarios

Relationship between pennation angle and muscle quality across different age groups

Andrés Santiago Parodi-Feye[1], Carol M. Torres[2], Bruno Andrés Escajal-Ceballos[3], Carlos Magallanes[4]

Resumen

El envejecimiento está asociado con una disminución de la calidad muscular (CM). Cambios arquitectónicos, como la reducción del ángulo de penación (AP), podrían explicar parte de este deterioro, aunque la evidencia es contradictoria. El presente estudio tuvo como objetivo comparar la CM de los músculos flexo-extensores de rodilla y el AP del recto femoral (RF) y bíceps femoral (BF) en jóvenes, adultos y adultos mayores. Participaron 66 personas saludables (22 por grupo; jóvenes = 22.1 ± 1.6 años; adultos = 49.9 ± 8.3 años; adultos mayores = 71.0 ± 6.4 años; distribución equilibrada por sexo). Se midió el AP de los músculos RF y BF mediante ecografía, junto con la fuerza isométrica máxima de flexión y extensión de rodilla, y el área de sección transversal anatómica (ACSA). Se calculó la fuerza específica (normalizada por el ACSA) como indicador de CM. Las diferencias entre grupos se analizaron mediante ANOVA de un factor, y las correlaciones entre AP y fuerza mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Se observaron disminuciones significativas con la edad en la masa muscular, la fuerza isométrica y la fuerza específica ($p < 0.05$; $d = 0.78–1.74$). No se hallaron diferencias significativas en el AP de ninguno de los músculos. No se evidenciaron correlaciones entre el AP y la fuerza isométrica ni para el RF ni para el BF ($r = 0.18$ y 0.13, respectivamente; $p > 0.05$). Los hallazgos del presente trabajo sugieren que el AP no sería un indicador sensible del deterioro de la CM.

Palabras claves: Arquitectura muscular, ángulo de penación, calidad muscular, envejecimiento, fuerza específica.

Recibido: 10 de octubre de 2025 Aceptado: 11 de noviembre de 2025
Received: 10 October 2025 *Accepted: 11 November 2025*

[1] Maestría en Actividad Física y Salud
andresparodi2005@yahoo.com
Instituto Superior de Educación Física (ISEF), Universidad de la República (Udelar), Uruguay
[2] maguitango17@gmail.com
Instituto Superior de Educación Física (ISEF), Universidad de la República (Udelar), Uruguay
[3] brunoescajal@hotmail.com
Instituto Superior de Educación Física (ISEF), Universidad de la República (Udelar), Uruguay
[4] camagallanes@gmail.com
Instituto Superior de Educación Física (ISEF), Universidad de la República (Udelar), Uruguay

Abstract

Aging is associated with a decline in muscle quality (MQ). Architectural changes, such as a reduction in the pennation angle (PA), could explain part of this deterioration, although the evidence is contradictory. The present study aimed to compare the MQ of the knee flexor-extensor muscles and the PA of the rectus femoris (RF) and biceps femoris (BF) in young adults, adults, and older adults. Sixty-six healthy individuals participated (22 per group; young = 22.1 ± 1.6 years; adults = 49.9 ± 8.3 years; older adults = 71.0 ± 6.4 years; balanced distribution by sex). The PA of the RF and BF muscles was measured using ultrasound, along with the maximum isometric strength of knee flexion and extension, and the anatomical cross-sectional area (ACSA). Specific strength (normalized by ACSA) was calculated as an indicator of MQ Differences between groups were analyzed using one-way ANOVA, and correlations between PA and strength using Pearson's correlation coefficient. Significant decreases in muscle mass, isometric strength, and specific strength were observed with age ($p < 0.05$; $d = 0.78–1.74$). No significant differences were found in the PA of any of the muscles. No correlations were found between PA and isometric strength for either RF or BF ($r = 0.18$ and 0.13, respectively; $p > 0.05$). The findings of the present study suggest that PA is not a sensitive indicator of MQ deterioration.

Keywords: Muscle architecture, pennation angle, muscle quality, aging, specific force.

Introducción

La sarcopenia y la fragilidad, condiciones altamente prevalentes en la vejez, se asocian no solo con la pérdida de masa muscular, sino también con alteraciones en la arquitectura intramuscular que comprometen la capacidad funcional. En particular, la reducción de la calidad muscular (CM), definida como la capacidad de generar fuerza normalizada por unidad de masa o área de sección muscular (Barbat-Artigas et al., 2012), se ha vinculado con un mayor riesgo de caídas, trastornos metabólicos, hospitalización, pérdida de independencia y aumento de la mortalidad. Dichas asociaciones se han documentado tanto en población general como en contextos clínicos (Larsson et al., 2019).

Entre los cambios arquitectónicos que se han sugerido como potenciales indicadores de CM destacan el ángulo de penación (AP), la longitud del fascículo y el área de sección transversal fisiológica (Physiological Cross-Sectional Area, PCSA). En conjunto, estas variables contribuirían a explicar las diferencias interindividuales y etarias observadas en el desempeño neuromuscular (Charles et al., 2023).

Este problema adquiere particular relevancia cuando el deterioro de la CM afecta los miembros inferiores, especialmente la musculatura del muslo, dado su papel crucial en la marcha, el control postural y la transferencia de fuerza. La evidencia actual muestra que distintos indicadores de cantidad y calidad muscular en esta región anatómica se asocian con el rendimiento físico y con marcadores clínicos de fragilidad, otorgando a su evaluación un valor diagnóstico y pronóstico (Fukasawa et al., 2017; Gao et al., 2022; Lv et al., 2022).

Desde el punto de vista funcional, dos músculos del muslo resultan de especial interés por su participación en el ciclo de la marcha y en actividades cotidianas: el

recto femoral (RF) y el bíceps femoral (BF). El RF, única porción biarticular del cuádriceps, actúa sobre la cadera y la rodilla, siendo especialmente relevante en la fase previa e inicial del balanceo, en el control de la extensión de cadera hacia el final de la zancada y en la flexión de cadera durante la marcha lenta (Nene et al., 2004; Valerius et al., 2013). El BF, por su parte, participa en la extensión y estabilización de la cadera (en especial cuando el tronco se encuentra inclinado hacia adelante) y en la flexión y rotación lateral de la rodilla. Además, su inserción en la cabeza de la fíbula le confiere un papel estabilizador de la articulación tibiofibular proximal (Neumann, 2010). Estas diferencias anatómico-funcionales justifican un análisis diferenciado de los cambios arquitectónicos asociados al envejecimiento en ambos músculos.

En este contexto, la ecografía musculoesquelética se presenta como una herramienta accesible, no invasiva y confiable para caracterizar la arquitectura muscular, incluido el AP, siempre que se estandaricen la posición, el sitio anatómico y las condiciones de medición. El AP constituye un parámetro clave al reflejar la orientación de los fascículos respecto de las aponeurosis musculares y determinar un mayor PCSA en relación con el volumen muscular, lo que repercute positivamente en la capacidad de transmisión de fuerza al tendón. Por tanto, los cambios del AP con el envejecimiento podrían tener un efecto potencialmente deletéreo y directo sobre el rendimiento funcional.

En adultos mayores (AM), y al menos en el caso del RF, se han propuesto puntos de corte del AP para identificar fragilidad, lo que refuerza su posible utilidad clínica (Yurumez et al., 2024). No obstante, la literatura presenta resultados heterogéneos y no concluyentes: mientras algunos estudios describen reducciones del AP con la edad, otros informan estabilidad relativa o asociaciones débiles con la fuerza y el desempeño funcional, posiblemente debido a diferencias metodológicas, regiones musculares analizadas y características de las muestras (Bunout et al., 2023; Yurumez et al., 2024). La falta de consenso plantea la necesidad de estudios comparativos que integren medidas estructurales y funcionales en un mismo abordaje, permitiendo así una comprensión más completa del impacto del envejecimiento sobre el desempeño neuromuscular.

En este marco, el presente trabajo se orientó a examinar la arquitectura del RF y del BF en relación con la fuerza de flexoextensión de rodilla, con el propósito de comparar su variación entre diferentes grupos de edad. De este planteo deriva la pregunta central de investigación: cómo se relacionan el AP y la fuerza específica de los músculos del muslo con el envejecimiento, y en qué medida dichas variaciones difieren entre los músculos considerados.

Con base en lo anterior, el objetivo del estudio fue cuantificar y comparar, en tres grupos etarios (jóvenes, adultos y AM) la CM de músculos del muslo, estimada a partir de la fuerza específica (fuerza normalizada por el área de sección transversal anatómica, ACSA) en la flexoextensión de rodilla, así como el AP del RF y del BF. Se buscó caracterizar el patrón de cambio asociado a la edad y explorar su especificidad según el gesto y el músculo analizados.

Se planteó la hipótesis de que el envejecimiento se asocia con una disminución de la CM, reflejada en una menor fuerza específica en ambos gestos,

así como con una reducción del AP en ambos músculos. Además, se propuso que la magnitud de estos cambios sería músculo-dependiente, en concordancia con sus diferencias anatómico-funcionales y con la variabilidad regional descrita en la literatura.

Método

El presente estudio fue aprobado por el Comité de Ética del Instituto Superior de Educación Física (ISEF) de la Universidad de la República (Udelar) (Resolución N.º 26/2023). Todos los procedimientos se ajustaron a los principios establecidos en la Declaración de Helsinki (revisión 2013). Las evaluaciones se realizaron en el Laboratorio de Fisiología del Ejercicio, con temperatura ambiente controlada de 23 °C.

Participantes

Se utilizó un muestreo no probabilístico por cuotas de conveniencia, reclutando voluntarias y voluntarios con proximidad institucional al laboratorio. Se incluyeron 66 personas adultas, sanas, asintomáticas y físicamente activas (categorías II o III del cuestionario IPAQ), sin antecedentes de práctica deportiva competitiva ni obesidad (índice de masa corporal [IMC] < 30 kg/m² para menores de 65 años y < 32 kg/m² para mayores o iguales a 65 años) (Babiarczyk y Turbiarz, 2012).

Los participantes se estratificaron en tres grupos etarios: adultos jóvenes (18 –35 años, media = 22.1 ± 1.6 años; IMC = 24.2 ± 2.8 kg/m2), adultos (40 – 60 años, media = 49.9 ± 8.3 años; IMC = 26.6 ± 3.1 kg/m2) y AM (≥ 65 años, media = 71.0 ± 6.4 años; IMC = 27.8 ± 3.1 kg/m2). Cada grupo incluyó 22 participantes (11 mujeres y 11 varones), manteniendo la igualdad muestral entre grupos para favorecer los supuestos estadísticos del ANOVA.

Los puntos de corte etarios se establecieron con base en los siguientes criterios: (i) 18 años como umbral legal de adultez en Uruguay; (ii) 40 años como rango a partir del cual se describen cambios asociados a la edad en la arquitectura y función muscular (Faulkner et al., 2007); y (iii) 65 años como criterio habitual para definir población mayor según las guías del American College of Sports Medicine (ACSM) y la American Heart Association (AHA) (Haskell et al., 2007), coincidente con la definición de vejez adoptada por la normativa uruguaya (Ley N.º 17.796).

Procedimientos

Tras completar la ficha de datos personales, los participantes respondieron la versión corta del International Physical Activity Questionnaire (IPAQ). Posteriormente, se evaluaron ambos miembros inferiores. Se midió el perímetro del muslo medio con una cinta antropométrica metálica inextensible (Lufkin Executive® W606PM, Crescent Lufkin, EE. UU.) con resolución de 1 mm, y el pliegue cutáneo anterior del muslo con un plicómetro profesional Harpenden® (Holtain Ltd., Reino Unido) con resolución de 0.2 mm.

Con estos datos se estimó el área transversal muscular del muslo mediante la fórmula de Frisancho (1981). Todas las mediciones siguieron el protocolo de la International Society for the Advancement of Kinanthropometry (ISAK) (Sirvent y Alvero, 2017), realizadas por un evaluador certificado como instructor ISAK nivel III.

A continuación, con el sujeto sobre una camilla en posición de decúbito, se determinó el AP de los músculos RF y BF del miembro derecho mediante ecografía bidimensional (Sonosite Micromaxx®, 6–13 MHz, EE. UU.), modo B. El

transductor se colocó sobre la zona media del vientre muscular donde se presentaba mayor volumen, identificada por palpación manual tras solicitar una contracción isométrica voluntaria: flexión de rodilla a ~90° en decúbito ventral (BF) o flexión de cadera con rodilla extendida en decúbito dorsal (RF). Se empleó abundante gel conductor para minimizar la presión del transductor sobre la piel (González-Seguel et al., 2023).

El AP se midió en relación con la dirección de los fascículos y la aponeurosis profunda (figura 1). Siguiendo el protocolo de Lizama-Pérez et al. (2023), se realizaron tres mediciones por imagen sobre los fascículos más evidentes, utilizando el promedio como valor final. Las mediciones se efectuaron con el software libre ImageJ (versión 1.8.0, National Institutes of Health). Dado que los valores entre hemicuerpos fueron similares (diferencias < 10%, no significativas; $p > 0.05$), solo se consideraron los datos del miembro derecho para el análisis.

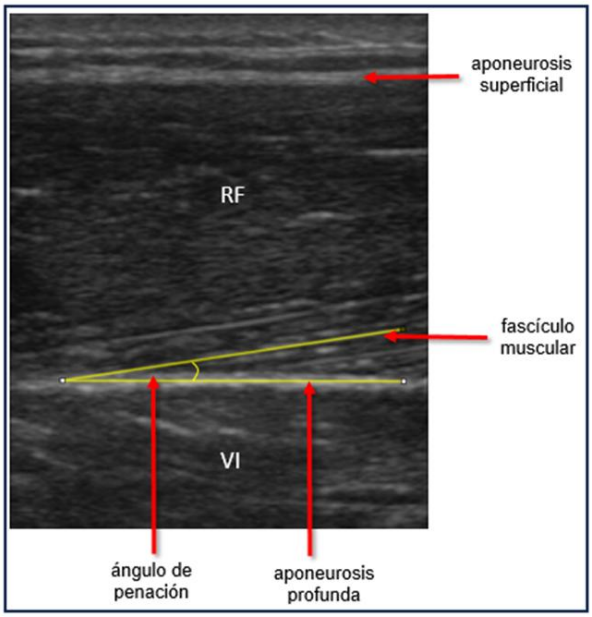

Figura 1.
Determinación del ángulo de penación del músculo Recto Femoral (RF)

Nota: Se consideró como referencia la dirección de las fibras en relación con la aponeurosis profunda. La imagen es representativa de la muestra analizada. El ángulo fue determinado mediante el software ImageJ (NIH, EE.UU.). VI = Vasto Intermedio

Finalmente, se evaluó la fuerza isométrica máxima (pico) en los movimientos de flexión y extensión de la rodilla derecha. Previamente, los participantes realizaron un calentamiento estandarizado (~10 min) con movilidad articular y estiramientos dinámicos y estáticos breves.

Para las pruebas, los sujetos se sentaron sobre un banco elevado, sin calzado y con las rodillas flexionadas a 90°, verificado con goniómetro manual. Se colocó una tobillera en el tobillo derecho conectada a un dinamómetro electromecánico (Dynasystem® DynaBlackbox, España) mediante un cable metálico inextensible, registrando los datos con el software correspondiente.

Durante las contracciones, se indicó a los participantes que sujetaran los bordes del banco a la altura del trocánter mayor, manteniendo el tronco erguido. Se les solicitó realizar contracciones isométricas máximas de extensión de rodilla (cuádriceps) durante 5 segundos, alcanzando el pico de fuerza en el menor tiempo posible. Cada participante realizó tres intentos con al menos dos minutos de descanso pasivo entre ellos. El mismo procedimiento se aplicó para la flexión de rodilla.

Para el análisis, se consideró el mayor valor obtenido en cada gesto. De acuerdo con evidencia previa sobre el efecto facilitador del estímulo verbal en el rendimiento de fuerza máxima (Romdhani et al., 2024), durante las contracciones se proporcionó aliento verbal motivacional.

La fuerza específica se determinó sumando los valores de fuerza en extensión y flexión, y dividiendo el resultado entre el ACSA, obteniendo así la capacidad de fuerza normalizada por unidad de área muscular.

Análisis estadístico

Los datos se expresan como media ± desviación estándar. Tras verificar los supuestos de normalidad (test de Shapiro–Wilk) y homogeneidad de varianzas (test de Levene), se aplicó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) sin repetición para comparar los grupos etarios.

Las correlaciones entre la fuerza isométrica de extensión y el AP del RF, así como entre la fuerza de flexión y el AP del BF, se analizaron mediante el test de Pearson. Los coeficientes se interpretaron como: sin correlación (0–0.19), débil (0.20–0.49), moderada (0.50–0.79) y fuerte (≥ 0.80) (Roy-García et al., 2019).

El tamaño del efecto se estimó con el estadístico ***d*** de Cohen: sin efecto (≤ 0.20), pequeño (0.21–0.49), moderado (0.50–0.79) y grande (≥ 0.80) (Caycho et al., 2016). Los valores extremos (outliers) se eliminaron cuando la puntuación Z superó las 3 desviaciones estándar respecto de la media. Se estableció un nivel de significancia estadística de $p < 0.05$. Todos los análisis se realizaron con el software estadístico libre **JASP** (versión 0.16.4.0, *University of Amsterdam*).

Resultados

Los resultados correspondientes a la evaluación de la fuerza isométrica de flexo-extensión de rodilla, el ACSA del muslo y la fuerza específica se presentan en la **Tabla 1.**

Tabla 1.

Valores de fuerza y área de sección transversal, diferenciados por grupo etario

	Jóvenes	Adultos	AM	Valor *p*
Fuerza Iso. Ext. (N)	521.8 ± 123.0	393.2 ± 142.5	306.5 ± 96.5	< 0.001*
Fuerza Iso. Flex. (N)	270.2 ± 75.1	246.1 ± 87.1	191.2 ± 57.2	0.003 *
ACSA (cm^2)	229.2 ± 33.8	194.8 ± 47.3	180.4 ± 39.9	< 0.001 *
Fuerza específica (N/cm^2)	3.5 ± 0.7	3.3 ± 0.8	2.8 ± 0.6	0.008 *

Abreviaturas: Fuerza Iso. Ext. = Fuerza Isométrica pico en Extensión; Fuerza Iso. Flex. = Fuerza Isométrica pico en Flexión; ACSA = Área de Sección Transversal Anatómica (Anatomical Cross-Sectional Area). El símbolo (*) indica diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$). Nota: la fuerza específica fue calculada como la suma de las fuerzas de extensión y flexión, normalizada por el ACSA. Todos los datos corresponden al miembro inferior derecho.

El análisis post-hoc mostró diferencias significativas en las siguientes comparaciones entre grupos etarios: en la **fuerza isométrica de extensión**, se observaron diferencias entre: jóvenes y adultos ($p = 0.008$; $d = 0.962$; efecto grande), adultos y adultos mayores ($p = 0.044$; $d = 0.776$; efecto grande) y jóvenes y adultos mayores ($p < 0.001$; $d = 1.739$; efecto grande). En la **fuerza isométrica de flexión**, se hallaron diferencias significativas únicamente entre jóvenes y adultos mayores ($p = 0.002$; $d = 1.066$; efecto grande). En cuanto al **ACSA**, se observaron diferencias entre jóvenes y adultos ($p = 0.020$; $d = 0.845$; efecto

grande) y entre jóvenes y adultos mayores ($p < 0.001$; $d = 1.198$; efecto grande). Por último, en la **fuerza específica**, solo se evidenció una diferencia significativa entre jóvenes y adultos mayores ($p = 0.008$; $d = 0.942$; efecto grande).

En todas las demás comparaciones, las diferencias no alcanzaron significancia estadística ($p > 0.05$).

Los valores obtenidos para el **AP** de los músculos RF y BF del miembro inferior derecho, diferenciados por grupo etario, se muestran en la **tabla 2** y en la figura 2. En el caso del RF, se observó una disminución no significativa ($p > 0.05$) del AP promedio en los grupos de mayor edad respecto de los jóvenes. En el BF, no se encontraron diferencias significativas ($p > 0.05$) en el AP entre los grupos.

Tabla 2.
Ángulos de penación (°) de los músculos Recto Femoral y Bíceps Femoral

Músculo	Jóvenes	Adultos	AM	Valor *p*
Recto Femoral	14.3 ± 3.8	12.5 ± 3.6	12.3 ± 2.6	**0.118**
Bíceps Femoral	**12.0 ± 4.1**	**11.9 ± 2.8**	**12.3 ± 3.9**	**0.949**

Nota: Los valores corresponden al miembro inferior derecho y están expresados en grados. Se utilizó el estadístico ANOVA de un factor sin repetición. AM = Adultos Mayores.

Figura 2.

Ángulo de penación de los músculos Bíceps Femoral (BF, gráfica izquierda) y Recto Femoral (RF, gráfica derecha) del miembro inferior derecho

Nota. Los puntos indican valores atípicos. Se realizó ANOVA de un factor sin repetición; en ningún caso se observó una diferencia estadísticamente significativa entre grupos ($p > 0.05$).

En relación con la correlación entre fuerza y AP, no se detectaron asociaciones significativas ni entre la fuerza extensora y el AP del RF ($r = 0.184$; $p = 0.141$), ni entre la fuerza flexora y el AP del BF ($r = 0.126$; $p = 0.332$).

Discusiones

El presente estudio comparó diferentes grupos etarios para analizar la relación entre la CM de la musculatura del muslo, estimada a partir de la fuerza específica de flexo-extensión de rodilla, y el AP de los músculos BF y RF, con el fin de determinar el posible efecto del envejecimiento sobre estas variables.

La medición del AP se realizó estandarizando la ubicación de la sonda sobre la zona media del vientre muscular, correspondiente al mayor volumen del músculo, aspecto relevante dado que esta variable puede variar significativamente según la región evaluada, incluso con igual ángulo articular (Ando et al., 2015; Martin-Rodríguez et al., 2024).

Tanto el RF como el BF presentan fibras musculares cuya dirección es oblicua en relación al tendón sobre el que se insertan, lo que determina su geometría peniforme. En el caso del RF, sus fibras se originan a cada lado de un fino y profundo tendón central, divergiendo distalmente para insertarse en una ancha aponeurosis que da formación al tendón patelar, por lo que se lo describe como un músculo bipenado

(Garland et al., 1994). En lo que respecta al BF, sus haces musculares se dirigen desde el tendón epimuscular de origen hasta el tendón epimuscular de inserción del lado opuesto, determinando de esta forma una conformación unipenada (Takeda et al., 2023).

En línea con lo esperado, los resultados mostraron una disminución significativa de la masa muscular ($p < 0.05$) y de la fuerza isométrica pico de flexo-extensión de rodilla en los grupos de mayor edad respecto de los más jóvenes, hallazgos consistentes con lo reportado previamente (Keller y Engelhardt, 2013; Rezuş et al., 2020; Samuel y Rowe, 2009). La reducción de la masa muscular podría relacionarse, al menos parcialmente, con la menor capacidad del músculo envejecido para activar simultáneamente las vías de señalización mTORC1 (*Mammalian Target of Rapamycin Complex 1*) y MAPK (*Mitogen-Activated Protein Kinase*), ambas implicadas en la síntesis proteica inducida por ejercicio o nutrición (Fry et al., 2011). Asimismo, la pérdida de fuerza con la edad se ha atribuido a múltiples factores: reducción de masa muscular, atrofia y pérdida selectiva de unidades motoras y fibras tipo II, alteraciones en la activación neuromuscular y aumento del tejido adiposo intramuscular, todo lo cual limita la capacidad contráctil (Yoshida et al., 2012).

Si bien tanto la fuerza como la masa muscular declinan con el envejecimiento, la evidencia indica que la fuerza declina en mayor proporción que la masa. Este desfasaje indicaría una alteración en la capacidad intrínseca de las fibras musculares para generar tensión, lo que se reflejaría en una disminución de la fuerza específica con el avance de la edad (Morse et al., 2005). En concordancia con estos hallazgos, en el presente estudio se observó una reducción significativa de la fuerza específica en los grupos de mayor edad, confirmando un deterioro progresivo en la calidad muscular asociado al envejecimiento.

Sin embargo, contrariamente a la hipótesis inicial, y a pesar de haberse verificado la pérdida de CM en los grupos de mayor edad en relación a los más jóvenes, no se observaron diferencias significativas en el AP entre los grupos etarios, aunque se evidenció una tendencia (no significativa, $p > 0.05$) a valores mayores de AP del RF en los adultos jóvenes respecto de adultos y AM.

Dado que un mayor AP suele asociarse a hipertrofia muscular, cabría esperar valores más altos en los grupos jóvenes, como reportaron Strasser et al. (2013) al comparar distintas porciones del cuádriceps entre sujetos jóvenes (24.2 ± 3.7 años) y mayores (67.8 ± 4.8 años). De modo similar, Jacob et al. (2022), al comparar sujetos en distintas franjas etarias (desde adultos jóvenes hasta AM), observaron que, tanto en hombres como en mujeres, el AP del vasto lateral disminuía a medida que los sujetos se hacían más añosos, aunque la diferencia solo alcanzaba significancia estadística a partir de los 50 años de edad (coincidiendo con el punto a partir del cual se verificaba una disminución de la fuerza y de la capacidad funcional de MMII).

Otros estudios también muestran reducciones del AP con la edad. Brauer et al. (2023) reportaron una diferencia significativa (14%, $p = 0.04$) en el AP del VL entre corredores de mediana edad (53.9 ± 2.5 años) y mayores (64.4 ± 3.5 años), con valores superiores en los primeros, pese a tratarse de sujetos altamente entrenados. Además, se ha sugerido que valores bajos de AP (<11.4°)

se asocian con atrofia muscular (Nieto-Taborda et al., 2019) y que valores menores a 10.65° podrían ser indicativos de fragilidad (Yurumez et al., 2024).

No obstante, la literatura presenta resultados heterogéneos. En este sentido, Vélez-Vázquez et al. (2022) encontraron un menor AP del VL en adultos de 40–60 años comparados con jóvenes (<40 años), pero un mayor AP a nivel del gastrocnemio medial (GM). Kubo *et al.* (2003) también reportaron, para ambos sexos, valores de AP significativamente mayores ($p < 0.001$) a nivel del VL de jóvenes (20 a 39 años) respecto de AM (60 a 85 años), aunque no hallaron diferencias a nivel del GM y del tríceps braquial. En contraste, Ryan et al. (2015) observaron un AP del GM 14% mayor en jóvenes (19.8 ± 1.7 años) que en AM (69.3 ± 3.3 años), ambos del sexo masculino (20.0 ± 2.9 grados vs. 17.2 ± 2.5 grados, respectivamente; $p < 0.01$). Estas inconsistencias podrían deberse, al menos en parte, a diferencias metodológicas, regiones analizadas o criterios de medición utilizados en los distintos estudios.

En conjunto, los resultados del presente trabajo y la falta de consenso en la literatura sugieren que el AP, al menos de forma aislada, no constituye un indicador sensible ni adecuado para detectar deterioro de la CM asociado al envejecimiento. En concordancia con esto, Vélez-Vázquez et al. (2022) también reportaron ausencia de correlación (r = 0.08) entre el AP del VL y la fuerza isométrica del cuádriceps, pese a que una reducción del AP debería reflejar menor número de sarcómeros en paralelo y, por ende, menor capacidad tensional (Narici y Maffulli, 2010). De modo similar, Bunout et al. (2023) hallaron asociaciones débiles o inexistentes entre el AP del RF y el rendimiento miofascial en adultos (31 a 52 años) y AM (65 a 73 años). La extrema complejidad de la contracción muscular, que incluye la rotación de las fibras musculares y la concomitante variación del AP durante la misma, representaría una limitante de la relevancia funcional de este parámetro (Lieber et al., 2022), lo que podría explicar la ausencia de asociaciones consistentes entre AP y fuerza observada en el presente trabajo.

Entre las principales limitaciones del presente estudio se destacan el tamaño muestral reducido y el análisis restringido a dos músculos superficiales, cuyas características arquitectónicas podrían no reflejar de manera integral la funcionalidad global del segmento evaluado, condicionando la generalización de los resultados. En este sentido, Ando et al. (2015) reportaron una correlación débil y no significativa entre el ángulo de penación del recto femoral (r = 0,20; p = 0,566) y la fuerza máxima isométrica de extensión de rodilla, mientras que el ángulo de penación del vasto intermedio (músculo profundo del cuádriceps) mostró una asociación sustancialmente mayor (r = 0,68), probablemente debido a que su tensión contribuye en mayor medida al momento extensor total de la rodilla (40–52%) en comparación con las otras tres porciones del cuádriceps femoral. Asimismo, la evaluación ecográfica se realizó en condición de reposo, lo que podría subestimar la variabilidad del AP, dado que este parámetro cambia dinámicamente durante la contracción muscular. Esta elección metodológica respondió a la necesidad de mantener condiciones estandarizadas y reproducibles, aunque podría limitar la sensibilidad del análisis para detectar variaciones funcionales.

Conclusiones

La pérdida de CM, especialmente en los AM, se asocia con un incremento en la morbimortalidad y con mayores niveles de dependencia funcional. Esta situación impacta de manera negativa en la calidad de vida y conlleva un aumento de los costos sociales vinculados a la atención médica prolongada y al cuidado asistencial. En este contexto, la identificación de indicadores sensibles a los cambios en la CM inducidos por el envejecimiento adquiere una importancia tanto diagnóstica como terapéutica.

Sin embargo, la ausencia de diferencias significativas en el AP de los músculos analizados entre los distintos grupos etarios sugiere que este parámetro podría estar menos afectado por el envejecimiento, o bien responder de manera específica a los procesos fisiológicos asociados a la edad. De igual forma, la falta de correlación entre el AP y la fuerza muscular observada refuerza la hipótesis de que esta variable, al menos de manera aislada, podría no constituir un marcador sensible del deterioro de la CM en el envejecimiento.

En conjunto, los resultados destacan la necesidad de continuar investigando y validando indicadores más precisos y fiables para la evaluación de la CM, tanto en el ámbito clínico como en la investigación aplicada a diferentes poblaciones.

Referencias

Ando, R., Saito, A., Umemura, Y., y Akima, H. (2015). Local architecture of the vastus intermedius is a better predictor of knee extension force than that of the other quadriceps femoris muscle heads. *Clinical physiology and functional imaging*, *35*(5), 376-382. https://doi.org/10.1111/cpf.12173

Babiarczyk, B., y Turbiarz, A. (2012). Body mass index in elderly people - Do the reference ranges matter? *Progress in Health Sciences, 2*(1), 58-65.

Barbat-Artigas, S., Rolland, Y., Zamboni, M., y Aubertin-Leheudre, M. (2012). How to assess functional status: a new muscle quality index. *The Journal of Nutrition, Health and Aging*, *16*(1), 67-77. https://doi.org/10.1007/s12603-012-0004-5

Brauer, A. G., Lima da Silva, A. E., Teixeira, J., Villarejo-Mayor, J. J., y Barauce- Bento, P. C. (2023). Muscle Architecture, Muscle Quality, and Neuromuscular Function of the Knee Extensor Muscle: A Comparison between Middle-aged and Older Endurance Runners. *Journal of Physical Education & Sport*, *23*(7), 1794-1803. https://doi.org/0.7752/jpes.2023.07219

Bunout, D., Gonzalez, S., Canales, M., Barrera, G., y Hirsch, S. (2023). Ultrasound assessment of rectus femoris pennation angle and echogenicity. Their association with muscle functional measures and fat infiltration measured by CT scan. *Clinical Nutrition ESPEN*, *55*, 420-424. https://doi.org/10.1016/j.clnesp.2023.04.015

Caycho, T., Ventura-León, J., y Castillo-Blanco, R. (2016). Magnitud del efecto para la diferencia de dos grupos en ciencias de la salud. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, *39*(3), 459-461. https://doi.org/10.23938/ASSN.0242

Charles, J. P., y Bates, K. T. (2023). The functional and anatomical impacts of healthy muscle ageing. Biology, 12(10), 1357. https://doi.org/10.3390/biology12101357

Faulkner, J. A., Larkin, L. M., Claflin, D. R., y Brooks, S. V. (2007). Age-related changes in the structure and function of skeletal muscles. *Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology*, *34*(11), 1091-1096. https://doi.org/10.1111/j.1440-1681.2007.04752.x

Frisancho, A. R. (1981). New norms for upper fat and muscle areas for assessment of nutritional status. *American Journal of Clinical Nutrition, 34*, 2540-2545

Fry, C. S., Drummond, M. J., Glynn, E. L., Dickinson, J. M., Gundermann, D. M., Timmerman, K. L., Walker, D. K., Dhanani, S., Volpi, E., y Rasmussen, B. B. (2011). Aging impairs contraction- induced human skeletal muscle mTORC1 signaling and protein synthesis. *Skeletal muscle*, *1*(11), 1-11. https://doi.org/10.1186/2044-5040-1-11

Fukasawa, H., Ishibashi, Y., Yokota, N., Tanabe, M., Morita, M., y Furuya, R. (2017). Lower thigh muscle mass is associated with all-cause and cardiovascular mortality in elderly hemodialysis patients. *European Journal of Clinical Nutrition, 71*(1), 64–69. https://doi.org/10.1038/ejcn.2016.186

Gao, J., Qiu, Y., Hou, Y., Zhang, L., Wang, K., Chen, Z., Liu, Q., y Lin, J. (2022). Influencing factors for the decline of limb muscle strength and the association with all-cause mortality: evidence from a nationwide population-based cohort study. *Aging Clinical and Experimental Research*, *34*(2), 399-407. https://doi.org/10.1007/s40520-021-01940-w

Garland, S. J., Gerilovsky, L., y Enoka, R. M. (1994). Association between muscle architecture and quadriceps femoris H-reflex. *Muscle & Nerve*, *17*(6), 581-592. https://doi.org/10.1002/mus.880170604

González-Seguel, F., Molina, J., y Ríos-Castro, F. (2023). Confiabilidad en ecografía muscular esquelética por evaluadores experimentados y novatos de cuidados críticos. *Revista Médica de Chile*, *151*(9), 1153-1163.

Haskell, W. L., Lee, I. M., Pate, R. R., Powell, K. E., Blair, S. N., Franklin, B. A., Macera, C. A., Heath, G. W., Thompson, P. D., y Bauman, A. (2007). Physical activity and public health: updated recommendation for adults from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. *Circulation*, *116*(9), 1081-1093. https://doi.org/10.1249/mss.0b013e3180616b27

Jacob, I., Johnson, M. I., Jones, G., Jones, A., y Francis, P. (2022). Age-related differences of vastus lateralis muscle morphology, contractile properties, upper body grip strength and lower extremity functional capability in healthy adults aged 18 to 70 years. *BMC geriatrics*, *22*(1), 1-15. https://doi.org/10.1186/s12877-022-03183-4

Keller, K., y Engelhardt, M. (2013). Strength and muscle mass loss with aging process. Age and strength loss. *Muscles*, *Ligaments and Tendons Journal*, *3*(4), 346-350. https://doi.org/10.11138/mltj/2013.3.4.346

Kubo, K., Kanehisa, H., Azuma, K., Ishizu, M., Kuno, S. Y., Okada, M., y Fukunaga, T. (2003). Muscle architectural characteristics in young and elderly men and women. *International Journal of Sports Medicine*, *24*(2), 125-130. https://doi.org/ 10.1055/s-2003-38204

Larsson, L., Degens, H., Li, M., Salviati, L., Lee, Y. I., Thompson, W., Kirkland, J. L., y Sandri, M. (2019). Sarcopenia: aging-related loss of muscle mass and function. *Physiological Reviews, 99*(1), 427-511. https://doi.org/10.1152/physrev.00061.2017

Ley N.º 17.796 (2004). *Código del Proceso Penal.* Diario Oficial de la República Oriental del Uruguay, 9 de agosto de 2004. https://www.impo.com.uy/bases/leyes/18617-2009

Lieber, R. L. (2022). Can we just forget about pennation angle? *Journal of Biomechanics*, *132*, 110954. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2022.110954

Lizama-Pérez, R., Muñoz-Cofré, R., Vidal-Seguel, N., Chirosa-Ríos, I., Jeréz-Mayorga, D., Intelangelo, L., y Chirosa Ríos, R. L. (2023). Influence of probe position in the measurement of muscle thickness and its association with lean mass: an ultrasound study. *International Journal of Morphology*, *41*(2):640-645. http://dx.doi.org/10.4067/S07179502023000200640

Lv, S., Ling, L., Shi, H., Chen, X., Chen, S., Zhu, S., Lin, W., Lv, R., y Ding, G. (2022). Application of muscle thickness and quality measured by ultrasound in frailty assessment in China. *Frontiers in medicine*, *9*, 859555. https://doi.org/10.3389/fmed.2022.859555

Martin-Rodriguez, S., Gonzalez-Henriquez, J. J., Diaz-Conde, J. C., Calbet, J. A., y Sanchis-Moysi, J. (2024). The relationship between muscle thickness and pennation angle is mediated by fascicle length in the muscles of the lower extremities. *Scientific Reports*, *14*(1), 14847. https://doi.org/10.1038/s41598-024-65100-6

Morse, C.I., Thom, J.M., Mian, O.S., Muirhead, A., Birch, K. M., y Narici, M. V. (2005). Muscle strength, volume and activation following 12-month resistance training in 70-year-old males. *European Journal of Applied Physiology*, *95*, 197–204. https://doi.org/10.1007/s00421-005-1342-3

Narici, M. V., y Maffulli, N. (2010). Sarcopenia: characteristics, mechanisms and functional significance. *British Medical Bulletin*, *95*(1), 139-159. https://doi.org/10.1093/bmb/ldq008

Nene, A., Byrne, C., y Hermens, H. (2004). Is rectus femoris really a part of quadriceps?: Assessment of rectus femoris function during gait in able-bodied adults. *Gait & posture*, *20*(1), 1-13. http://doi.org/10.1016/S0966-6362(03)00074-2

Neumann, D. A. (2010). Kinesiology of the hip: a focus on muscular actions. *Journal of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*, *40*(2), 82-94.

Nieto-Taborda, K. N., Galviz-Ruiz, G. E., Mantilla-Espinosa, R. A., Dávila, C. P., y Martínez-Lozano, D. J. (2019). Evaluación ecográfica de los parámetros estructurales del músculo en pacientes con lupus eritematoso sistémico. *Revista Colombiana de Radiología*, *30*(2), 5132-5137. https://doi.org/10.53903/01212095.78

Rezuş, E., Burlui, A., Cardoneanu, A., Rezuş, C., Codreanu, C., Pârvu, M., Rusu, G., y Tamba, B. I. (2020). Inactivity and skeletal muscle metabolism: a vicious cycle in old age. *International Journal of Molecular Sciences, 21*(2), 1-21. https://doi.org/10.3390/ijms21020592

Romdhani, A., Sahli, F., Ghouili, H., Trabelsi, O., Rebhi, M., Ben Aissa, M., Saidane, M., Guelmami, N., Dergaa, I., Haddad, M., y Zghibi, M. (2024). Exploring the impact of verbal encouragement on strength, endurance, and psychophysiological responses: enhancing teaching strategies in sports science education. *Frontiers in Sports and Active Living*, *6*, 1-11. https://doi.org/10.3389/fspor.2024.1360717

Roy-García, I., Rivas-Ruiz, R., Pérez-Rodríguez, M., y Palacios-Cruz, L. (2019). Correlación: no toda correlación implica causalidad. *Revista Alergia Mexico, 66*(3), 354-360. https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.651

Ryan, E. D., Rosenberg, J. G., Scharville, M. J., Sobolewski, E. J., Tweedell, A. J., y Kleinberg, C. R. (2015). Pennation Angle Does Not Influence the Age-Related Differences in Echo Intensity of the Medial Gastrocnemius. *Ultrasound in Medicine & Biology*, *41*(2), 618–621. https://doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2014.08.004

Samuel, D., y Rowe, P. J. (2009). Effect of ageing on isometric strength through joint range at knee and hip joints in three age groups of older adults. *Gerontology, 55*(6), 621-629. https://doi.org/10.1159/000236043

Sirvent, J., y Alvero, J. (2017). *La cineantropometría y sus aplicaciones*. Universitat d'Alicant.

Strasser, E. M., Draskovits, T., Praschak, M., Quittan, M., y Graf, A. (2013). Association between ultrasound measurements of muscle thickness, pennation angle, echogenicity and skeletal muscle strength in the elderly. *Age, 35*, 2377-2388. https://doi.org/10.1007/s113570139517-z

Takeda, K., Kato, K., Ichimura, K., y Sakai, T. (2023). Unique morphological architecture of the hamstring muscles and its functional relevance revealed by analysis of isolated muscle specimens and quantification of structural parameters. *Journal of Anatomy*, *243*(2), 284-296. https://doi.org/10.1111/joa.13860

Valerius, K., Frank, A., Kolster, B., Hirsch, M. C., Hamilton, C., y Lafont, E. A. (2013). *El libro de los músculos: anatomía, exploración, función* (5a ed.). Ars Médica.

Vélez-Vázquez, T., Carbonero-López, P., y del Baño Aledo, M. E. (2022). Estudio ecográfico de la arquitectura muscular de la musculatura de miembro inferior: Variabilidad según sexo y edad. *Fisioterapia*, *44*(1), 6-14. https://doi.org/10.1016/j.ft.2021.03.002

Yoshida, Y., Marcus, R. L., y Lastayo, P. C. (2012). Intramuscular adipose tissue and central activation in older adults. *Muscle & Nerve*, *46*, 813–816. https://doi.org/10.1002/mus.23506

Yurumez, B., Metin, Y., Atmis, V., Karadavut, M., Ari, S., Gemci, E., Yigit, S., Ozalp, F. S., Gozukara, M. G., Kaplankiran, C., Cosardereliogl u, C., Yalcin, A., Aras, S., y Varli, M. (2024). A new possible marker: can pennation angle defined by ultrasound predict the frailty? *Aging Clinical and Experimental Research*, *36*(1), 53. https://doi.org/10.1007/s40520-023-02663-w