

Efecto de un Programa Multicomponente Periodizado sobre los Parámetros Biomecánicos relacionados con el Mecanismo Lesional de Ligamento Cruzado Anterior en jugadoras de Fútbol Femenino. Ensayo Clínico Controlado.

Loreto Ferrández-Laliena¹, Lucía Vicente-Pina¹, Rocío Sánchez-Rodríguez¹, Graham J. Chapman², Badis Soussi³, César Hidalgo-García¹, María Orosia Lucha-López¹, José Miguel Tricás-Moreno¹ and Mira Ambrus^{3,4}

¹Unidad de Investigación en Fisioterapia, Spin off Centro Clínico OMT-E Fisioterapia SLP, Universidad de Zaragoza, Domingo Miral s/n, 50009 Zaragoza, Spain

²Allied Health Research Unit, School of Health, Social Work and Sport, University of Lancashire, Preston PR1 2HE, UK

³Research Center for Sport Physiology, Hungarian University of Sports Sciences, 1123 Budapest, Hungary;

⁴Department of Sports Medicine and Digital Health Sciences, Faculty of Health and Sport Sciences, Széchenyi István University, 9026 Győr, Hungary
Tel. +34-666295923, e-mail: lferrandez@unizar.es

Resumen

Este estudio propone evaluar la eficacia de un programa específico, multicomponente y periodizado, en la mejora de la calidad de movimiento y el control motor de la rodilla durante la ejecución de un COD en jugadoras de fútbol femenino de etapa formativa. Los resultados demostraron la mejora cinemática tridimensional acompañada de una optimización funcional de los músculos estabilizadores mediales de rodilla.

Introducción

El fútbol femenino está experimentando un crecimiento holístico exponencial, impulsado por el aumento de la participación, la profesionalización, el apoyo socioeconómico y la producción científica. Sin embargo, la persistente disparidad por cuestión de sexo en la incidencia de lesiones de rodilla, en particular la rotura del ligamento cruzado anterior (LCA), así como la elevada carga asociada a este cuadro clínico, ponen de manifiesto la necesidad urgente de desarrollar estrategias más eficaces para identificar los determinantes precursores de los mecanismos lesionales e implementar programas preventivos adecuados[1,2].

La eficacia de los programas de prevención de lesiones depende de la especificidad de su diseño, basado en la identificación de estos parámetros biomecánicos precursores del mecanismo lesional del LCA[1]. Estos programas tienen como objetivo minimizar ajustes potencialmente disfuncionales mediante la modificación de los patrones de

movimiento y el abordaje de los déficits neuromusculares[3,4]. De acuerdo con las recomendaciones clínicas, dichos programas deben adoptar una estructura multicomponente y estar guiados por criterios de progresión fundamentados en la biomecánica dentro de un modelo periodizado, que implique un incremento secuencial de las demandas funcionales[1,5]. Asimismo, la evidencia sugiere una mayor eficacia cuando se aplican en jugadoras de categorías formativas, ya que la plasticidad neuromuscular durante el desarrollo facilita la adaptación de los patrones motores de forma más eficiente que en jugadoras de élite con patrones de movimiento altamente automatizados[1,5].

No obstante, la mayoría de las mejoras funcionales reportadas en la bibliografía se han limitado a tareas de aterrizaje[3,4]. No se han observado cambios funcionales significativos en pruebas de cambio de dirección (COD), que representa el mecanismo lesional más prevalente según los estudios epidemiológicos. Esto probablemente esté debido al condicionante cinemático multiplanar y a los rápidos ajustes que caracterizan este tipo de acciones, cuya complejidad biomecánica dificulta la detección de adaptaciones funcionales mediante variables cinemáticas convencionales, como el rango de movimiento articular[3,5].

En consecuencia, la velocidad angular ha sido propuesta como un parámetro de innovación metodológica para caracterizar simultáneamente la velocidad y la direccionalidad de la excursión angular articular[6,7]. En este contexto, la velocidad

angular proporciona información estrechamente vinculada al control motor, actuando como un determinante de la calidad del movimiento al reflejar la velocidad y orientación del desplazamiento rotatorio articular segmentario regulado directamente por la actividad muscular [6,7]. De la misma manera, para optimizar el análisis del control motor, la bibliografía propone utilizar la actividad muscular electromiográfica (EMG), la cual permite cuantificar la contribución específica de cada músculo durante la estabilización motriz.

Por lo tanto, el presente estudio propone la implementación de un programa preventivo multicomponente y periodizado basado en el entrenamiento neuromuscular, la modificación de la técnica de COD y la retroalimentación en tiempo real [1,3,5]. Este enfoque integral tiene como objetivo mejorar la calidad del movimiento y el control motor, mediante el análisis sincronizado de variables cinemáticas de velocidad angular, y de actividad muscular EMG, en jugadoras de fútbol femenino de categoría sub-16, etapa en la que las adaptaciones neuromusculares aún son altamente modificables [2].

Métodos

Se llevó a cabo un ensayo controlado multicéntrico no aleatorizado con un diseño pre-post, en el que participaron 35 jugadoras de categoría cadete-juvenil regional femenina ($15,50 \pm 1,22$ años), grupo de intervención ($n = 17$) y grupo control ($n = 18$). El grupo de intervención completó un programa preventivo periodizado multicomponente de 12 semanas de duración, integrado dentro la planificación de entrenamiento habitual, mientras que el grupo control continuó con sus rutinas de entrenamiento sin recibir ninguna intervención adicional.

El programa periodizado se estructuró como un marco de trabajo compuesto por tres mesociclos progresivos, (ver Figura 1), diseñados para evolucionar desde la activación aislada y el fortalecimiento de la musculatura sinergista del LCA hacia la consolidación de un control motor eficiente en entornos específicos del fútbol [8]. Dada la etiología multifactorial de la lesión del LCA, la intervención adoptó una estructura multicomponente orientada a abordar de manera integral los parámetros biomecánicos disfuncionales precursores del mecanismo lesional. Para ello se diseñaron ejercicios funcionales mediante la interrelación del fortalecimiento específico, la resincronización neuromuscular, la pliometría, el entrenamiento

cognitivo y la retroalimentación en tiempo real como componentes de entrenamiento [1,5,8].

La intervención se aplicó en forma de un calentamiento estructurado de 20 minutos de duración, realizado tres veces por semana, concretamente al inicio de las sesiones de entrenamiento correspondientes a Match-5 y Match-4, así como tras el día de descanso intersemanal en la sesión Match-2 [8]. Esta estrategia de planificación se seleccionó con el objetivo de minimizar la acumulación excesiva de carga de entrenamiento y evitar posibles efectos negativos sobre el rendimiento en competición.

Se realizaron dos sesiones de evaluación, pre y post intervención utilizando el test de Change of Direction and Acceleration Test (CODAT) [9]. Como variables de análisis cinemáticas se registraron el valor pico y el rango de la velocidad angular del muslo, segmento femoral, y de la pierna, segmento tibial, en los tres planos del movimiento. Así como la media de la señal EMG rectificada y el pico de la señal envelope o envolvente como variables neuromusculares utilizando la amplitud de la señal electromiográfica normalizada de los músculos bíceps femoral (BF), semitendinoso (ST), vasto lateral (VL) y vasto medial (VM), durante las fases de preparación o previa a la carga, para la actividad muscular, y durante la fase de carga, para ambos parámetros biomecánicos, de la tarea funcional de COD.

La actividad muscular se registró mediante señales EMG utilizando cuatro sensores inalámbricos de superficie pertenecientes al sistema de electromiografía de superficie de referencia (gold standard) Trigno Avanti (Delsys Inc., Natick, Massachusetts, EE. UU.). Las velocidades angulares cinemáticas se obtuvieron a partir de las unidades de medición inercial integradas en los mismos sensores inalámbricos colocados sobre el VL, así como de un sensor adicional situado sobre la tuberosidad tibial anterior, mediante datos de giroscopio [10]. Los datos de EMG y de velocidad angular se exportaron en formato C3D y se procesaron utilizando el software Visual3D (HAS Motion, Kingston, Ontario, Canadá).

La normalidad de los datos se evaluó mediante el test de Shapiro-Wilk. Para las variables con distribución normal, se aplicó un ANOVA mixto de dos factores (grupo $\times$ tiempo) para analizar las diferencias en la velocidad angular y las variables EMG entre los grupos intervención y control, así como entre los momentos pre- y post-intervención. Cuando se observaron interacciones significativas, se realizaron

comparaciones post hoc mediante pruebas t independientes. Para las variables no normales, se emplearon las pruebas U de Mann-Whitney y rangos con signo de Wilcoxon para comparaciones intergrupales e intragrupal, respectivamente. El nivel de significación se estableció en $p < 0,05$. Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software SPSS Statistics versión 25.0 (IBM Corp., Armonk, NY, EE. UU.).

Resultados

El análisis post intervención reveló mejoras significativas en la velocidad angular del segmento tibial en los planos sagital y frontal; así como del segmento femoral en el plano transversal. Estos resultados cinemáticos se sustentaron sobre las mejoras significativas del patrón de actividad muscular EMG, particularmente del ST y el VM, sugestivas de una optimización de la función neuromuscular del complejo estabilizador medial de rodilla.

En el plano sagital, las adaptaciones cinemáticas observadas en el grupo intervención sugieren que, tras la aplicación del programa multicomponente, dicho grupo mostró una mayor eficacia para desacelerar rápidamente la velocidad angular inicial dirigiendo el movimiento segmentario de la pierna hacia la flexión y, generar más rápidamente la velocidad angular hacia la extensión necesaria para la frenada y reorientación corporal constituyentes de la maniobra de COD. Este patrón refleja una estrategia cinemática optimizada de transición desde el desplazamiento orientado a la flexión durante la fase de estabilización del COD hacia la fase de propulsión, dominada por un desplazamiento orientado a la extensión [3,11], (ver Figura 2).

Este patrón cinemático optimizado se complementa por una reducción de la velocidad angular de valgo de rodilla y una reducción de los picos y el ROM de velocidad angular en el plano transversal. Estos ajustes son claves en la definición del colapso en valgo, ampliamente reconocido como uno de los principales factores de riesgo del LCA [12,13]. Por lo tanto, el grupo intervención, tras la intervención, demostró un patrón cinemático más eficiente en términos de rendimiento y más seguro, mitigando la cinemática asociada al mecanismo lesional del LCA, (ver Figura 3 y 4).

Finalmente, durante la fase de carga del COD el grupo intervención presentó una reducción significativa de la media y pico de actividad EMG del músculo ST, junto con un aumento significativo de la

media de actividad EMG del VM. Considerando la naturaleza multiplanar de la cinemática de la rodilla durante tareas de COD, los isquiotibiales y el cuádriceps desempeñan un papel clave como estabilizadores de la articulación [14]. En particular, el ST comprime el compartimento medial y actúa sinérgicamente con el VM para proporcionar estabilidad medial y contrarrestar el mecanismo de *pivot-shift* [7]. De tal manera que la mejora de la calidad del movimiento descrita previamente podría reflejar un control motor más eficiente, (ver Figura 5).

Conclusiones

El programa periodizado multicomponente de 12 semanas modificó de manera eficaz la cinemática tridimensional de la rodilla y la actividad muscular durante la ejecución de tareas de COD en futbolistas jóvenes. Las mejoras en la calidad del movimiento se reflejaron en un incremento de los picos de velocidad angular de extensión y flexión, así como del rango de velocidad angular en el plano sagital del segmento tibial, junto con una reducción del pico y el rango de la velocidad angular en valgo del segmento tibial en el plano frontal. Asimismo, la intervención redujo de forma significativa los picos de velocidad angular de rotaciones interna y externa del segmento femoral, disminuyendo el rango de velocidad angular en el plano transversal. Estas adaptaciones cinemáticas se acompañaron de mejoras en el control motor, evidenciadas por una reducción de la media y del pico de actividad EMG del ST, así como por un incremento de la media de actividad EMG del VM.

Implicaciones clínicas

En conjunto, el programa periodizado multicomponente propuesto, basado en entrenamiento neuromuscular, modificación de la técnica de COD y retroalimentación en tiempo real, demostró ser eficaz para mejorar la calidad del movimiento y el control motor. Estas adaptaciones contribuyen a la reducción de ajustes biomecánicos potencialmente disfuncionales asociados a los mecanismos de lesión del LCA, lo que respalda la eficacia del programa como una estrategia preventiva específica frente a lesiones en jugadoras de fútbol femenino de categorías base formativa, una población caracterizada por una alta plasticidad neuromuscular. La implementación temprana de este tipo de intervenciones clínicas puede promover mejoras a corto y largo plazo en la función motriz, contribuyendo de manera significativa a la reducción del desarrollo de ajustes biomecánicos

REFERENCIAS (deben seguir todas el mismo formato: Estilo ISO 690 -ver anexo-)

- [1]. ARUNDALE, A., BIZZINI M., DIX, C., et al. Exercise-Based Knee and Anterior Cruciate Ligament Injury Prevention. *Journal of Orthopaedic and Sports Physical Therapy*. 2023, 53, 31-34. <https://doi.org/10.2519/jospt.2023.0301>.
- [2]. LARRUSKAIN, J., LEKUE, J.A., ANGULO, P., et al. An injury burden heat map of all men's and women's teams of a professional football club over a decade. *Research in Sports Medicine* 2024 (32) 740–50. <https://doi.org/10.1080/15438627.2023.2228959>.
- [3]. DOS'SANTOS, T., THOMAS, C. COMFORT, P., et al. The Effect of Training Interventions on Change of Direction Biomechanics Associated with Increased Anterior Cruciate Ligament Loading: A Scoping Review. *Sports Medicine* 2019 (49) 1837-1859. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01171-0>.
- [4]. OLIVARES-JABALERA, J., FILTER-RUGER, A., DOS'SANTOS, T., et al. Exercise-Based Training Strategies to Reduce the Incidence or Mitigate the Risk Factors of Anterior Cruciate Ligament Injury in Adult Football (Soccer) Players: A Systematic Review. *Int J Environ Res Public Health* 2021(18) <https://doi.org/10.3390/IJERPH182413351>.
- [5]. WANG, D., VALTONEN, A.M., THIEL, T., et al. Effects of Exercise-Based ACL Injury Prevention Interventions on Knee Motion in Athletes: A Systematic Review and Bayesian Network Meta-Analysis. *J Orthop Sports Phys Ther* 2025 (55) 1–14. <https://doi.org/10.2519/jospt.2024.12720>.
- [6]. WAKABAYASHI, K., OGASAWARA, I., SUZUKI, Y., et al. Exploring pre-impact landing kinematics associated with increase and decrease in the anterior cruciate ligament injury risk. *J Biomech* 2022 (145) <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2022.111382>.
- [7]. JEONG, J., CHOI, D.H., SHIN, C.S. Association Between the Medial-Lateral Quadriceps and Hamstring Muscle Thickness and the Knee Kinematics and Kinetics During Single-Leg Landing. *Sports Health*. 2023(15)519–526. <https://doi.org/10.1177/19417381231152476>.
- [8]. BOGGENPOEL, B.Y., NEL, S., HANEKOM, S. The use of periodized exercise prescription in rehabilitation: a systematic scoping review of literature. *Clin Rehabil* 2018(32) 1235–1248. <https://doi.org/10.1177/0269215518769445>.
- [9]. FERRÁNDEZ-LALIENA, L., VICENTE-PINA, L., SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, R., Differences in Kinematic and Muscle Activity Between ACL Injury Risk and Healthy Players in Female Football: Influence of Change of Direction Amplitude in a Cross-Sectional Case-Control Study. *Medicina* 2025(61)1259. <https://doi.org/10.3390/medicina61071259>.
- [10]. BUDINI, K., RICHARDS, J., COLE, T., et al. An exploration of the use of Inertial Measurement Units in the assessment of dynamic postural control of the knee and the effect of bracing and taping. *Physiother Pract Res* 2018(39) 91–98. <https://doi.org/10.3233/PPR-180111>.
- [11]. EBNER, C., GRANACHER, U., GEHRING, D. Effects of Anticipation and Dual-Tasking on Lower Limb Biomechanics While Performing Change-of-Direction Tasks in Physically Active Individuals: A Systematic Review with Meta-Analysis. *Sports Medicine* 2025. <https://doi.org/10.1007/s40279-025-02182-w>.
- [12]. BEAULIEU, M.L., ASHTON-MILLER, J.A., WOJTYS, E.M. Loading mechanisms of the anterior cruciate ligament. *Sports Biomech* 2023 (22) 1–29. <https://doi.org/10.1080/14763141.2021.1916578>.
- [13]. LUCARNO, S., ZAGO, M., BUCKTHORPE, M., et al. Systematic Video Analysis of Anterior Cruciate Ligament Injuries in Professional Female Soccer Players. *American Journal of Sports Medicine* 2021 (49)1794-1802. <https://doi.org/10.1177/03635465211008169>.
- [14]. NASSERI, A., AKHUNDOV, R., BRYANT, AL., et al. Limiting the Use of Electromyography and Ground Reaction Force Data Changes the Magnitude and Ranking of Modelled Anterior Cruciate Ligament Forces. *Bioengineering* 2023(10). <https://doi.org/10.3390/bioengineering10030369>.

PROGRAMA PERIODIZADO



Figura 1. Estructura de periodización de objetivos y criterios de progresión de fases en el Programa Multicomponente Periorizado implementado.

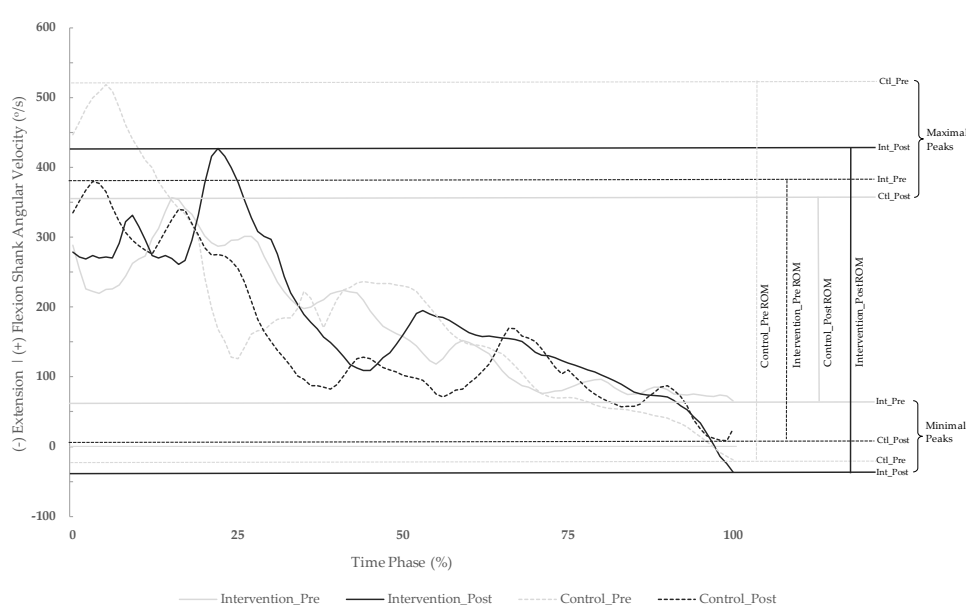


Figura 2. Análisis comparativo del rango de velocidad angular del segmento tibial en el plano sagital entre el grupo intervención y el grupo control en los tiempos pre- y post- intervención.

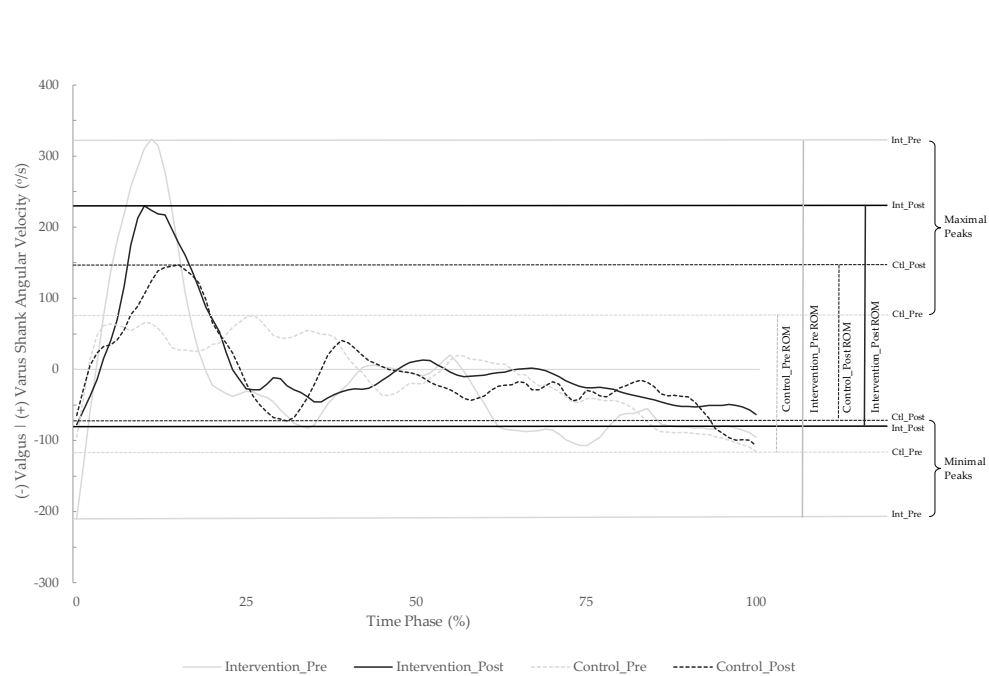


Figura 3. Análisis comparativo del rango de velocidad angular del segmento tibial en el plano frontal entre el grupo intervención y el grupo control en los tiempos pre- y post- intervención.

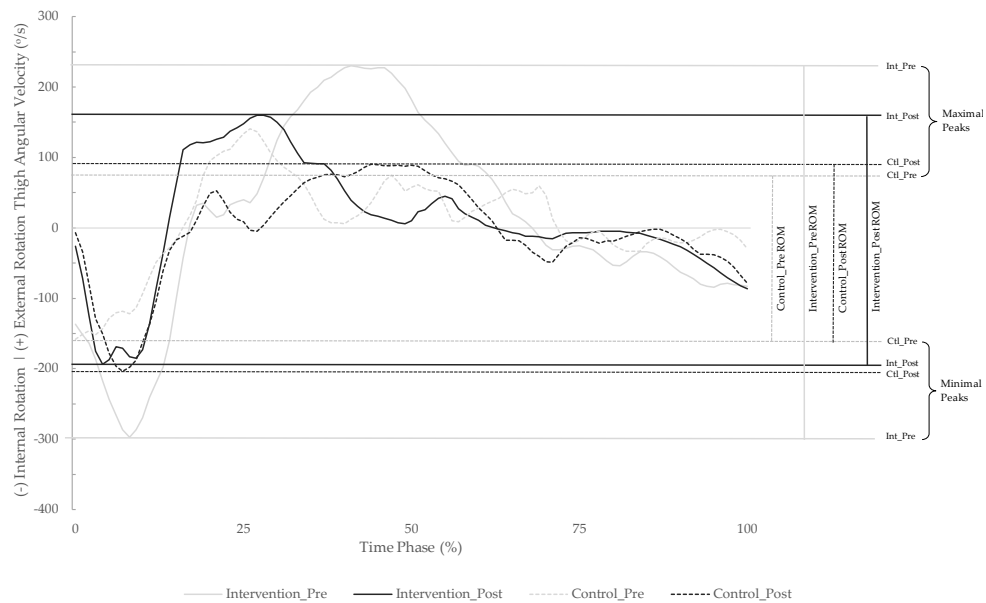


Figura 4. Análisis comparativo del rango de velocidad angular del segmento femoral en el plano trasversal entre el grupo intervención y el grupo control en los tiempos pre- y post- intervención.

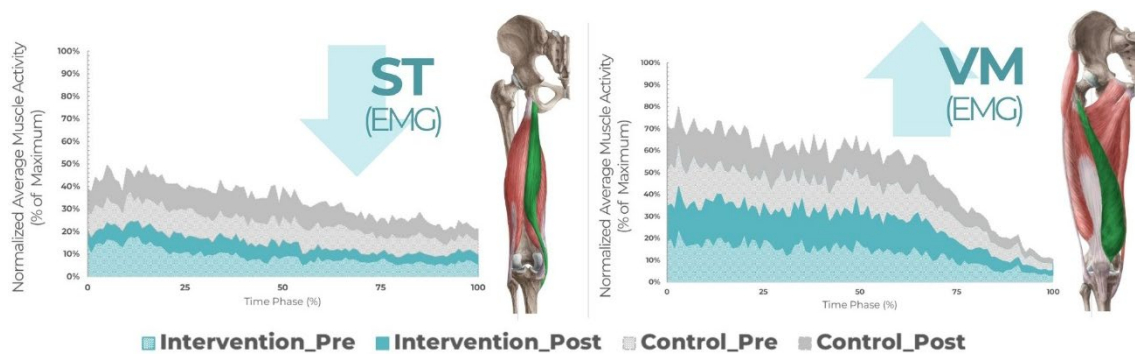


Figura 5. Análisis comparativo de la actividad muscular electromiográfica media del semitendinoso y del vasto medial en la fase de carga del cambio de dirección entre el grupo intervención y el grupo control en los tiempos pre- y post- intervención.