Ciencia y Educación
(L-ISSN: 2790-8402 E-ISSN: 2707-3378)
Vol. 7 No. 12.1
Edición Especial XII 2026

ENTRENAMIENTO CRUZADO CONTRALATERAL DESPUÉS DE RECONSTRUCCIÓN DEL LCA, CON ÉNFASIS BIOMECÁNICO: REVISIÓN SISTEMÁTICA

CONTRALATERAL CROSS-TRAINING FOLLOWING ACL RECONSTRUCTION, WITH A BIOMECHANICAL FOCUS: A SYSTEMATIC REVIEW

Autores: [1]Jorge Paúl López Acosta, [2]Lizbeth Salomé Maldonado García, [3]Andrea Estefanía Marín Cordero, [4]Erick Steve Jordán Cruz y [5]Katherine Guadalupe Jordán Cruz.

[1]ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-5250-6394
[2]ORCID ID: https://orcid.org/0009-0000-2870-8826
[3]ORCID ID: https://orcid.org/0009-0009-4334-6400
[4]ORCID ID: https://orcid.org/0009-0007-4278-0315
[5]ORCID ID: https://orcid.org/0009-0004-2161-6725
[1]E-mail de contacto: pauln16@outlook.com
[2]E-mail de contacto: salomaldonado97@gmail.com
[3]E-mail de contacto: andreamarinc52@gmail.com
[4]E-mail de contacto: ejordan0823@pucesa.edu.ec
[5]E-mail de contacto: katherinejordan240@gmail.com
Afiliación: [1]*Escuela de Formación de Soldados del Ejército - ESFORSE, (Ecuador) [2]*[3]*Universidad Politécnica Salesiana, (Ecuador) [4]*Docente Pontificia Universidad Católica del Ecuador, (Ecuador) [5]*Universidad Regional Autónoma de los Andes, (Ecuador).
Articulo recibido: 21 de Octubre del 2026
Articulo revisado: 31 de Octubre del 2026
Articulo aprobado: 9 de Noviembre del 2026
[1]Médico general, egresado de la Universidad Técnica de Ambato, (Ecuador). Con 4 años de experiencia laboral. Médico de la Escuela de Formación de Soldados del Ejército - ESFORSE, (Ecuador).
[2]Licenciada en Terapia Física, egresada de la Universidad de Cuenca, (Ecuador). Con 5 años de experiencia laboral. Magíster en Salud Pública, egresada de la Universidad Internacional del Ecuador, (Ecuador).
[3]Licenciada en Fisioterapia, egresada de la Universidad de Cuenca, (Ecuador). Con 3 años de experiencia laboral. Magíster en Neurorehabilitación, egresada de la Universidad de las Américas, (Ecuador).
[4]Médico general, egresado de la Universidad Técnica de Ambato, (Ecuador). Con 4 años de experiencia laboral. Maestrante en Docencia en Educación Superior, Universidad Estatal de Milagro, (Ecuador). Especialista en Salud y Seguridad Ocupacional con mención en Salud Ocupacional, egresado de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, (Ecuador).
[5]Estudiante de Medicina de la Universidad Regional Autónoma de los Andes, (Ecuador).

Resumen

El objetivo de esta revisión sistemática fue analizar los efectos del entrenamiento cruzado contralateral sobre la fuerza muscular, la simetría funcional y las variables biomecánicas después de la reconstrucción del ligamento cruzado anterior, considerando intervenciones complementarias de rehabilitación. Se realizó una búsqueda bibliográfica de publicaciones comprendidas entre 2018 y 2026 en las bases de datos PubMed, Scopus, Web of Science, SciELO y Embase. Se seleccionaron 13 investigaciones relacionadas con la recuperación muscular, el control neuromuscular y la biomecánica posquirúrgica. La información se organizó según las características de las intervenciones, las variables evaluadas, los instrumentos de medición y los principales hallazgos, mediante una síntesis cualitativa. Los resultados evidenciaron que determinados protocolos de entrenamiento contralateral atenuaron la pérdida de fuerza del cuádriceps y favorecieron su recuperación durante las primeras etapas de rehabilitación. Asimismo, se identificaron mejoras en el equilibrio postural, la activación muscular y algunos parámetros de la marcha, incluida la distribución de presiones plantares. Sin embargo, otros estudios no encontraron beneficios adicionales frente a la rehabilitación convencional, las intervenciones complementarias mostraron resultados variables sobre la fuerza y la mecánica articular. Se concluye que el entrenamiento cruzado contralateral constituye una estrategia coadyuvante prometedora para la recuperación muscular posquirúrgica, aunque sus efectos sobre la cinemática tridimensional y la cinética de rodilla permanecen limitados e

inconsistentes, la recuperación de fuerza no garantiza por sí sola la normalización biomecánica.

Palabras clave: Entrenamiento cruzado, Ligamento cruzado, Rehabilitación posquirúrgica, Biomecánica, Cuádriceps.

Abstract

The objective of this systematic review was to analyze the effects of contralateral cross-training on muscle strength, functional symmetry, and biomechanical variables following anterior cruciate ligament reconstruction, taking into account complementary rehabilitation interventions. A literature search was conducted for publications from 2018 to 2026 in the PubMed, Scopus, Web of Science, SciELO, and Embase databases. Thirteen studies related to muscle recovery, neuromuscular control, and postoperative biomechanics were selected. The information was organized according to the characteristics of the interventions, the variables assessed, the measurement instruments, and the main findings, using a qualitative synthesis. The results showed that certain contralateral training protocols mitigated quadriceps strength loss and promoted its recovery during the early stages of rehabilitation. Improvements were also identified in postural balance, muscle activation, and certain gait parameters, including plantar pressure distribution. However, other studies found no additional benefits compared to conventional rehabilitation, and complementary interventions showed variable results regarding strength and joint mechanics. It is concluded that contralateral cross-training is a promising adjunctive strategy for post-surgical muscle recovery; however, its effects on three-dimensional kinematics and knee kinetics remain limited and inconsistent, and strength recovery alone does not guarantee biomechanical normalization.

Keywords: Cross-training, Cruciate ligament, Postoperative rehabilitation, Biomechanics, Quadriceps.

Sumário

O objetivo desta revisão sistemática foi analisar os efeitos do treino cruzado contralateral sobre a força muscular, a simetria funcional e as variáveis biomecânicas após a reconstrução do ligamento cruzado anterior, tendo em conta intervenções complementares de reabilitação. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica de publicações entre 2018 e 2026 nas bases de dados PubMed, Scopus, Web of Science, SciELO e Embase. Foram selecionados 13 estudos relacionados com a recuperação muscular, o controlo neuromuscular e a biomecânica pós-cirúrgica. A informação foi organizada de acordo com as características das intervenções, as variáveis avaliadas, os instrumentos de medição e as principais conclusões, através de uma síntese qualitativa. Os resultados evidenciaram que determinados protocolos de treino contralateral atenuaram a perda de força do quadríceps e favoreceram a sua recuperação durante as primeiras fases da reabilitação. Além disso, foram identificadas melhorias no equilíbrio postural, na ativação muscular e em alguns parâmetros da marcha, incluindo a distribuição das pressões plantares. No entanto, outros estudos não encontraram benefícios adicionais em relação à reabilitação convencional, e as intervenções complementares apresentaram resultados variáveis no que diz respeito à força e à mecânica articular. Conclui-se que o treino cruzado contralateral constitui uma estratégia adjuvante promissora para a recuperação muscular pós-cirúrgica; no entanto, os seus efeitos sobre a cinemática tridimensional e a cinética do joelho continuam a ser limitados e inconsistentes, e a recuperação da força, por si só, não garante a normalização biomecânica.

Palavras-chave: Treino cruzado, Ligamento cruzado, Reabilitação pós-cirúrgica, Biomecânica, Quadríceps.

Introducción

La ruptura del ligamento cruzado anterior (LCA) representa una de las lesiones musculoesqueléticas de mayor impacto en la medicina del deporte y la ortopedia contemporánea. A nivel mundial, se calcula que anualmente se llevan a cabo aproximadamente

un millón de procedimientos de reconstrucción del ligamento cruzado anterior (LCA-R), correspondiendo únicamente a los Estados Unidos cerca de 350.000 intervenciones quirúrgicas al año, según los datos sintetizados por Daggett, M., et al. (2022), esta incidencia se concentra predominantemente en atletas jóvenes y de edad activa que participan en disciplinas deportivas que exigen desaceleraciones bruscas, saltos y pivotes multidireccionales, tales como el fútbol, el baloncesto, el voleibol y el fútbol americano, de acuerdo con las revisiones clínicas de Badawy, C., et al (2022) mientras que en el ámbito epidemiológico de Latinoamérica, la carga de la lesión del LCA adquiere matices socio-sanitarios particulares. Aunque la prevalencia de la lesión en atletas latinoamericanos refleja la tendencia global propiciada por la masiva práctica del fútbol profesional y recreativo, la gestión de la rehabilitación posquirúrgica enfrenta desafíos estructurales. Diversos análisis sobre barreras clínicas en fisioterapia, expuestos por Kotsifaki, R., et al. (2023) y Figueroa, D., et al. (2022), destacan que el acceso inequitativo a centros especializados de rehabilitación funcional, la variabilidad socioeconómica y la escasez de tecnología biomecánica avanzada de evaluación tales como la dinamometría isocinética computarizada y los sistemas de análisis de movimiento en tres dimensiones que condicionan la evolución clínica de los pacientes en la región. En muchos entornos hospitalarios y comunitarios de América Latina, los programas de rehabilitación continúan guiándose de manera rígida por cronogramas temporales arbitrarios de seis meses, en lugar de progresiones basadas en criterios objetivos de maduración funcional y biomecánica, lo que incrementa la vulnerabilidad de los deportistas ante eventuales recidivas (Brinlee, A., et al. 2021).

La reconstrucción quirúrgica del LCA mediante autoinjertos fundamentalmente el tendón patelar con tacos óseos (BPTB), el tendón isquiotibial o el tendón cuadricipital (QT) tiene como objetivo primario restablecer la estabilidad pasiva tibiofemoral y la cinemática articular para favorecer el retorno al deporte. Sin embargo, existe una marcada discrepancia entre las expectativas del paciente y los resultados funcionales reales a largo plazo, las guías de práctica clínica de Aspetar presentadas por Kotsifaki, R., et al. (2023), junto con la revisión de Badawy, C., et al (2022), revelan que, aunque aproximadamente el 80% de los pacientes operados logra retornar a alguna forma de actividad física, únicamente entre el 55% y el 65% consigue reincorporarse a su nivel competitivo previo a la lesión.

Tabla 1. *Realidad clínica vs. expectativas*

Epidemiológico	Valor Registrado	Fuente Bibliográfica
Incidencia anual global de LCA-R.	~1,000,000 de procedimientos al año.	Daggett, M., et al. (2022)
Retorno al deporte competitivo pre-lesión.	55% a 65% de los pacientes intervenidos.	Kotsifaki, R., et al. (2023); Badawy, C., et al (2022)
Tasa de segunda lesión en atletas jóvenes	Hasta un 20% (50% en el primer año posquirúrgico).	Daggett, M., et al. (2022); Sajedi, H., et al. (2025)
Reducción del ángulo pico de flexión de rodilla en marcha.	-2.63° global (SMD = -1.14 en fase temprana <6 meses).	Sajedi, H., et al. (2025)
Prevalencia de osteoartritis femorotibial a 10-15 años.	30% a 80% de la cohorte operada.	Sajedi, H., et al. (2025); Solie, B., et al. (2024)

Fuente: *Elaboración propia*

Esta tasa insatisfactoria de éxito funcional se ve agravada por la alarmante prevalencia de re-rupturas del injerto y lesiones del LCA contralateral. Daggett, M., et al. (2022), documentan que la tasa de segunda lesión en atletas jóvenes y físicamente activos alcanza hasta un 20%, ocurriendo la mitad de estos eventos traumáticos secundarios durante el primer año posterior a la cirugía primaria. La evidencia sugiere que el retorno prematuro a la competición, impulsado por evaluaciones

clínicas que omiten déficits biomecánicos sutiles, predispone directamente a fallos catastróficos del injerto o a compensaciones destructivas en la extremidad sana.

Más allá del riesgo de re-lesión, la reconstrucción del LCA no garantiza la restauración de la mecánica articular fisiológica durante tareas funcionales cotidianas como la marcha. En un metaanálisis sistemático reciente desarrollado por Sajedi, H., et al. (2025), que evaluó a más de 1.000 participantes a través de 32 estudios biomecánicos, se demostró la persistencia de alteraciones cinemáticas y cinéticas significativas en la extremidad operada en comparación con la extremidad contralateral sana donde identificaron una reducción en el ángulo pico de flexión de la rodilla durante la fase de apoyo de la marcha (diferencia media estandarizada, SMD= -0.39; equivalente a una reducción angular de 2.63°), con un efecto especialmente profundo en la fase temprana postoperada menor a 6 meses (SMD= -1.14) y a medio plazo entre 6 y 12 meses (SMD= -0.52). Desde una perspectiva cinética, la extremidad operada exhibe reducciones sistemáticas en el momento extensor interno de la rodilla (SMD= -0.31) y en el momento flexor pico (SMD= -0.37), reflejando una estrategia persistente de descarga o "protección articular" mediante la cual el paciente evita la activación enérgica del extensor (Koc, B., et al. 2026). Estas alteraciones biomecánicas crónicas alteran la trayectoria normal de contacto femorotibial durante la marcha, desplazando las cargas compresivas hacia zonas del cartílago articular no adaptadas mecánicamente. Como señalan Sajedi, H., et al. (2025) y Solie, B., et al. (2024), este entorno de estrés de cizallamiento e hiperpresión focal desencadena la degradación prematura de la matriz extracelular del cartílago, lo que explica por qué entre el 30% y el 80% de los pacientes sometidos a LCA-R desarrollan signos radiográficos de osteoartritis posparto/postraumática dentro de los 10 a 15 años posteriores a la intervención quirúrgica.

El obstáculo primario en la rehabilitación posterior a la reconstrucción del LCA es la debilidad profunda y persistente del músculo cuádriceps femoral como explican Solie, B., et al. (2024) en su síntesis de biología muscular, la agresión quirúrgica, la distensión capsular por efusión articular y el cosechado del autoinjerto desencadenan un fenómeno neurofisiológico reflejo denominado inhibición muscular artrogénica (AMI). La AMI se caracteriza por una alteración en la excitabilidad de las motoneuronas espinales que impide la activación volitiva completa del cuádriceps, produciendo una atrofia acelerada por desuso que se manifiesta desde los primeros días posteriores a la cirugía, esta dificultad para reclutar volitivamente el cuádriceps se ve magnificada por las características neuroanatómicas basales del grupo muscular. Solie, B., et al. (2024) destacan que el cuádriceps posee el umbral de reclutamiento volitivo e inactivación basal más alto de toda la extremidad inferior en comparación con los flexores de codo o los dorsiflexores, cuando la AMI se superpone a este elevado umbral de activación, las contracciones voluntarias ordinarias son incapaces de alcanzar las unidades motoras de alto umbral (fibras tipo IIx), acelerando la pérdida de masa muscular y la disminución dramática en la tasa de desarrollo de fuerza (RFD).

Tradicionalmente, la recuperación de la fuerza del cuádriceps se ha evaluado mediante el índice de simetría de extremidades (LSI), definiendo como criterio de alta o progresión la obtención de una fuerza en la extremidad operada equivalente al 80%, 90% o 100% de la extremidad contralateral no operada. No

obstante, en un riguroso estudio de revisión sistemática y metaanálisis realizado por Brown, C., et al. (2021), que comparó a 730 pacientes con LCA-R frente a 590 controles sanos emparejados a priori por edad, sexo y nivel de actividad física, se demostró que el uso del LSI constituye un paradigma metodológicamente defectuoso que sobreestima gravemente la recuperación del paciente.

Tabla 2. *La Falacia del índice de simetría de extremidades (LSI) y déficits bilaterales*

Fase Postoperatoria	Magnitud del déficit de cuádriceps	Interpretación del tamaño del efecto
0 a 6 meses posquirúrgicos	SMD = -1.42 (IC 95%: -1.62 a -1.23)	Efecto grande (Déficit muy severo)
6 a 18 meses posquirúrgicos	SMD = -0.92 (IC 95%: -1.18 a -0.66)	Efecto grande (Déficit severo persistente)
> 18 a 48 meses posquirúrgicos	SMD = -0.38 a -0.60 (IC 95%: -0.83 a -0.37)	Efecto moderado (Déficit crónico a largo plazo)

Fuente: *Elaboración propia*

El metaanálisis evidenció que la extremidad operada presenta déficits masivos de fuerza isométrica e isocinética del cuádriceps al compararse con controles verdaderamente sanos: un efecto muy grande entre los 0 y 6 meses (SMD= -1.42), un efecto grande entre los 6 y 18 meses (SMD= -0.92, período coincidente con el retorno habitual al deporte), y déficits moderados persistentes hasta los 48 meses postoperatorios (SMD= -0.38 a -0.60).

El fallo inherente del LSI radica en que la extremidad contralateral "sana" no permanece intacta, como señalan Brown, C., et al. (2021) y Solie, B., et al. (2024), la extremidad no operada experimenta déficits neuromusculares bilaterales inducidos por la reorganización corticomotora central y el desacondicionamiento sistémico, al disminuir la fuerza de la extremidad contralateral, el ratio de simetría (LSI) se infla artificialmente, permitiendo que atletas con debilidad bilateral profunda superen los test de simetría y reciban el alta médica prematuramente, lo que incrementa el riesgo de re-ruptura o de lesión en la rodilla contralateral, incapaces de generar momentos extensores de rodilla adecuados debido a la debilidad del cuádriceps, los pacientes con LCA-R adoptan patrones de movimiento supercompensatorios, en investigaciones cinéticas y cinemáticas discutidas por Badawy, C., et al (2022) y Daggett, M., et al. (2022), se demuestra que, durante las fases de marcha, aterrizaje de saltos unipodales y maniobras de corte, los pacientes desarrollan una dominante "estrategia de cadera". Esta estrategia consiste en redistribuir el trabajo mecánico hacia los extensores de la cadera y los flexores plantares del tobillo para absorber la fuerza de reacción del suelo, reduciendo el momento de flexión/extensión de la rodilla operada. En evaluaciones dinámicas como el salto vertical con contramovimiento (CMJ) y el salto unipodal para distancia, estas asimetrías se manifiestan mediante la reducción en la altura del salto, menor potencia pico de despegue y una deficiente atenuación de impactos en el aterrizaje, como recalcan Kotsifaki, R., et al. (2023) y Figueroa, D., et al. (2022), estas adaptaciones compensatorias perpetúan el patrón de carga asimétrica, impiden la restitución de la memoria motora y mantienen al paciente en un estado continuo de riesgo neuromuscular ante tareas impredecibles de alta demanda deportiva.

Ante la imposibilidad de someter a la extremidad operada a cargas mecánicas intensas durante las fases agudas y subagudas de la rehabilitación por compromisos biológicos del injerto, dolor o efusión, surge el entrenamiento cruzado contralateral (cross-education o CE) donde la educación cruzada es un fenómeno neurofisiológico caracterizado por el incremento de fuerza, rendimiento motor y capacidad de activación neuromuscular en una extremidad no entrenada o inmovilizada como

resultado del entrenamiento de fuerza unilateral ejecutado con la extremidad homóloga contralateral, según la revisión realizada por Calvert, G., et al. (2021).

Tabla 3. *Mecanismos neurales centrales y modulación corticospinal*

Componente neuroanatómico	**Mecanismo adaptativo en entrenamiento cruzado**	**Implicación clínica en rehabilitación LCA-R**
Corteza Motora Primaria (M1) Ipsilateral	Reorganización de redes corticomotoras e incremento del drive descendente.	Aumenta la descarga corticoespinal hacia el cuádriceps denervado/inhibido.
Proyecciones Transcallosales e Interhemisféricas	Reducción de la inhibición interhemisférica transcallosal.	Facilita la excitabilidad motora de la corteza correspondiente al lado operado.
Áreas Premotoras (PMd y SMA)	Reclutamiento de circuitos de planificación motora y acoplamiento intermanual.	Preserva la programación motora fina de la extremidad lesionada e inmovilizada.
Vías Corticoespinales y Espinales	Reclutamiento amplificado de motoneuronas alfa y sincronización motora.	Mitiga la pérdida de unidades motoras de alto umbral por desuso.

Fuente: *Elaboración propia*

A diferencia de las adaptaciones musculares periféricas tradicionales, el mecanismo mediador primario de la educación cruzada reside de forma exclusiva en el sistema nervioso central (SNC). Calvert, G., et al. (2021) aclaran que la intervención no produce hipertrofia directa medible en el músculo no entrenado en sus etapas iniciales, sino que altera las propiedades de red de la corteza cerebral y la médula espinal, el entrenamiento de fuerza unilateral desencadena un aumento en la descarga corticoespinal descendente hacia el músculo de la extremidad activa, generando simultáneamente un "desbordamiento motor" (motor overflow) neural que facilita los circuitos motores de la extremidad contralateral inactiva (Glattke, K., et al. 2021).

Las vías neuroanatómicas específicas involucradas en el cross-education incluyen las proyecciones transcallosales que interconectan ambas cortezas motoras primarias (M1), así como conexiones que involucran a la corteza premotora dorsal (PMd) y al área motora suplementaria (SMA). Calvert, G., et al. (2021) destacan que el entrenamiento unilateral sostenido reduce la inhibición intracortical y la inhibición interhemisférica transcallosal, lo que permite que las adaptaciones plásticas inducidas en el hemisferio entrenado aumenten la excitabilidad motora de la representación cortical correspondiente a la extremidad inmovilizada o intervenida, en el contexto específico de los pacientes sometidos a reconstrucción del LCA, este mecanismo neural adquiere un valor terapéutico extraordinario. Al entrenar intensamente el cuádriceps de la extremidad sana no operada, se logra "superar" o puentear la inhibición muscular artrogénica (AMI) presente en el lado quirurgizado. El incremento en el impulso neural central propagado a través de las vías interhemisféricas contrarresta la depresión de las motoneuronas espinales del lado operado, facilitando el reclutamiento volitivo de motoneuronas que de otro modo permanecerían inactivas por la AMI.

Los parámetros de prescripción del ejercicio unilateral condicionan drásticamente la magnitud de la educación cruzada, en la revisión sistemática sobre dosificación del entrenamiento unilateral desarrollada por Voskuil, C., et al. (2023), se establece que los programas que utilizan intensidades elevadas de carga ≥70-80% de una repetición máxima, 1-RM y frecuencias de entrenamiento tradicionales de 2 a 3 sesiones por semana logran la mayor transferencia contralateral de fuerza, un hallazgo de crucial relevancia clínica reportado por Voskuil, C., et al. (2023) y respaldado en las recomendaciones de Kotsifaki, R., et al. (2023) es la superioridad del modo de contracción excéntrica, la realización de contracciones excéntricas unilaterales de alta intensidad en la extremidad no entrenada

desencadena respuestas plásticas centrales superiores y produce ganancias aditivas de fuerza en el lado contralateral en comparación con las contracciones concéntricas o isométricas puras. Asimismo, la adición de técnicas de neuromodulación coadyuvante sobre la extremidad entrenada o la extremidad contralateral puede potenciar el efecto neuroplástico del cross-education, preservando significativamente la masa muscular, el volumen y la capacidad generadora de fuerza en la extremidad operada durante la fase crítica de restricción de carga.

A pesar de la sólida fundamentación neurofisiológica del entrenamiento cruzado contralateral y de sus prometedores resultados en modelos de inmovilización y accidentes cerebrovasculares, su implementación práctica en la rehabilitación de la reconstrucción del LCA muestra discrepancias notables en la literatura clínica. Guías internacionales de amplio consenso, reportan evidencia contradictoria o de baja certeza respecto a la efectividad sostenida del cross-education sobre la fuerza máxima del cuádriceps a lo largo de las distintas fases de rehabilitación, más severa aún es la laguna de conocimiento respecto a los efectos del entrenamiento cruzado sobre las variables biomecánicas y funcionales cinemáticas y cinéticas. La gran mayoría de los ensayos clínicos aleatorizados sobre cross-education en LCA-R se han centrado casi exclusivamente en la medición del pico de torque isométrico o isocinético mediante dinamometría, existe una escasez crítica de estudios que investiguen si la transferencia de fuerza neural lograda mediante el entrenamiento contralateral.

Dada la alta tasa de persistencia de déficits mecánicos y de fuerza del cuádriceps hasta 4 años después de la cirugía, la elevada incidencia de osteoartritis secundaria y las limitaciones de los protocolos convencionales basados en el LSI, resulta imperioso evaluar intervenciones innovadoras que ataquen la causa raíz del problema: el fallo en el drive neural central. El entrenamiento cruzado contralateral ofrece una herramienta terapéutica no invasiva, de bajo costo y de inmediata aplicación posquirúrgica que no compromete la integridad del injerto ni expone a la rodilla operada a estrés mecánico prematuro. Sin embargo, sin una síntesis sistemática que analice detalladamente la evidencia con un enfoque eminentemente biomecánico, los profesionales de la salud, fisioterapeutas y cirujanos ortopédicos carecen de directrices claras sobre cómo integrar el cross-education dentro de la periodización de la rehabilitación. Se requiere esclarecer qué parámetros de dosificación, qué fases postoperatorias se benefician en mayor medida y qué variables biomecánicas específicas responden favorablemente a esta intervención.

Con el propósito de subsanar este vacío en el conocimiento científico y brindar una herramienta analítica fundamentada para la práctica basada en la evidencia, se establece el siguiente objetivo de analizar los efectos del entrenamiento cruzado contralateral sobre la fuerza muscular, las asimetrías funcionales y las variables biomecánicas en pacientes sometidos a reconstrucción del ligamento cruzado anterior.

Materiales y Métodos

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión sistemática con enfoque cualitativo y énfasis biomecánico, orientada a analizar los efectos del entrenamiento cruzado contralateral sobre la recuperación de la fuerza muscular, la simetría funcional y las variables biomecánicas después de la reconstrucción del ligamento cruzado anterior. Asimismo, se incorporaron investigaciones sobre estrategias complementarias de rehabilitación

neuromuscular y criterios de evaluación funcional, con el propósito de contextualizar los resultados específicos del entrenamiento contralateral. La organización metodológica se fundamentó en las recomendaciones de la declaración PRISMA 2020 donde la búsqueda bibliográfica comprendió publicaciones correspondientes al período 2018-2026, mediante la consulta de las bases de datos PubMed, Scopus, Web of Science, SciELO y Embase.

Se utilizaron términos relacionados con la reconstrucción del ligamento cruzado anterior, el entrenamiento cruzado contralateral, la rehabilitación neuromuscular y las variables biomecánicas. Entre los descriptores considerados se incluyeron anterior cruciate ligament reconstruction, cross-education, contralateral training, neuromuscular training, rehabilitation, muscle strength, quadriceps, gait biomechanics, kinematics, kinetics, postural balance y limb symmetry. Para identificar investigaciones complementarias también se contemplaron términos vinculados con la restricción del flujo sanguíneo, la estimulación eléctrica neuromuscular y las intervenciones funcionales. Los descriptores se combinaron mediante los operadores booleanos AND y OR, con adaptaciones según las características de cada base de datos.

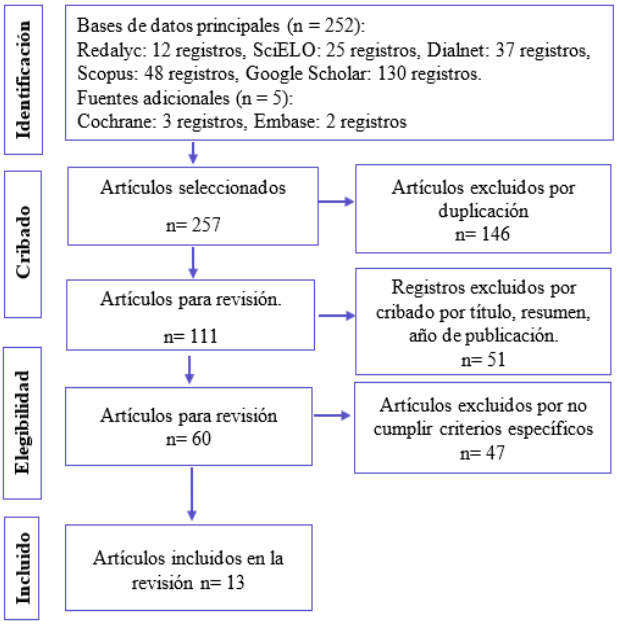
Los criterios de elegibilidad se organizaron mediante una adaptación del modelo PICOS. La población de interés estuvo constituida principalmente por pacientes sometidos a reconstrucción quirúrgica del ligamento cruzado anterior. La intervención principal correspondió al entrenamiento cruzado contralateral, entendido como la aplicación de ejercicios de fuerza o control neuromuscular en la extremidad no operada para favorecer adaptaciones en la extremidad intervenida. Los comparadores incluyeron rehabilitación convencional, grupos control y otras modalidades de intervención, según el diseño de cada estudio, los resultados de interés comprendieron fuerza muscular, torque articular, simetría interextremidades, equilibrio postural, activación electromiográfica, parámetros de la marcha, cinemática, cinética articular y recuperación funcional. Se consideraron investigaciones experimentales, ensayos clínicos aleatorizados y estudios observacionales pertinentes para la interpretación clínica y biomecánica.

Para la síntesis de evidencia directa se consideraron las investigaciones que evaluaron el entrenamiento cruzado contralateral en pacientes sometidos a reconstrucción del ligamento cruzado anterior, De manera diferenciada, se incorporaron estudios sobre estimulación eléctrica neuromuscular, restricción del flujo sanguíneo, entrenamiento funcional, intervenciones mediante ortesis y criterios clínicos de retorno al deporte, estas investigaciones se utilizaron como evidencia complementaria para contextualizar la recuperación muscular y biomecánica, sin considerar sus resultados como efectos atribuibles al entrenamiento cruzado contralateral.

Se consideraron publicaciones desarrolladas en seres humanos, comprendidas entre 2018 y 2026, que presentaran información sobre la recuperación muscular, el control neuromuscular, la funcionalidad o las alteraciones biomecánicas posteriores a la reconstrucción del ligamento cruzado anterior. Se excluyeron estudios realizados en animales, investigaciones in vitro, reportes de caso único, editoriales y publicaciones sin información suficiente sobre sus procedimientos o resultados. Las revisiones previas y las guías de práctica clínica se emplearon para la fundamentación teórica y la discusión, sin

contabilizarse como investigaciones primarias en la síntesis de resultados, La selección de publicaciones se estructuró mediante las etapas de identificación de registros, eliminación de duplicados, revisión de títulos y resúmenes, evaluación de textos completos y selección de investigaciones pertinentes. Estas etapas corresponden al procedimiento de selección descrito en la declaración PRISMA 2020. La representación del proceso mediante un diagrama de flujo requiere consignar las cantidades efectivamente registradas en cada etapa, así como los motivos de exclusión de los textos completos. (Figura 1).

Figura 1: *Diagrama Prisma*



Fuente: *Elaboración propia*

La síntesis final presentada en la Tabla 4 comprendió 13 investigaciones. De ellas, seis abordaron directamente el entrenamiento cruzado contralateral, mientras que siete aportaron evidencia complementaria sobre otras estrategias de rehabilitación o criterios de evaluación funcional, Para organizar la información se consideraron seis componentes: autor y año de publicación, tamaño muestral, características de la intervención, variables evaluadas, instrumentos de medición y principales resultados. Esta clasificación permitió distinguir los hallazgos directamente relacionados con el entrenamiento contralateral de aquellos obtenidos mediante otras intervenciones terapéuticas.

La valoración crítica de las investigaciones se orientó a considerar las características metodológicas de cada diseño, las diferencias entre los grupos de comparación, los procedimientos de intervención, los instrumentos de evaluación y las limitaciones señaladas en los estudios. Para los ensayos clínicos aleatorizados, la herramienta Cochrane RoB 2 constituye un instrumento pertinente para evaluar sistemáticamente el riesgo de sesgo; no obstante, su aplicación y los resultados correspondientes deben documentarse individualmente antes de afirmar que se completó dicha evaluación. Los estudios observacionales requieren una valoración diferenciada, acorde con sus objetivos y características metodológicas.

Debido a la heterogeneidad de las intervenciones, los períodos posoperatorios, las características de las muestras y las variables de resultado, se realizó una síntesis narrativa, sin metaanálisis. El análisis se centró en identificar coincidencias, discrepancias y limitaciones entre las investigaciones, prestando especial atención a la recuperación de la fuerza del cuádriceps, la simetría funcional, el equilibrio postural y los parámetros cinemáticos y cinéticos. Finalmente, se distinguieron las ganancias de fuerza muscular de las modificaciones biomecánicas medidas directamente, con el propósito de evitar que las mejoras en el rendimiento muscular fueran interpretadas automáticamente como una normalización de la mecánica articular.

Resultados

Los 13 estudios recopilados abordaron diferentes estrategias de intervención y evaluación orientadas a la recuperación de la fuerza muscular, el control neuromuscular y la funcionalidad después de la reconstrucción del ligamento cruzado anterior (LCA). Las investigaciones centradas específicamente en el entrenamiento cruzado contralateral presentaron resultados heterogéneos, con hallazgos favorables sobre la fuerza del cuádriceps, el equilibrio postural y determinados parámetros de la marcha, mientras que otros estudios no identificaron beneficios adicionales respecto a la rehabilitación convencional. Asimismo, se analizaron investigaciones sobre intervenciones complementarias y criterios de evaluación funcional, cuyos resultados permitieron contextualizar las alteraciones cinemáticas, cinéticas y neuromusculares durante la recuperación posquirúrgica. En la Tabla 4 se presentan las características metodológicas y los principales hallazgos de las 13 investigaciones consideradas.

Tabla 4. *Características de los estudios y efectos del entrenamiento cruzado contralateral y terapias coadyuvantes después de la reconstrucción del LCA.*

Autor / Año	Muestra (n)	Intervención	Variables	Instrumentos	Resultados
Minshull, C., et al. (2021)	n = 44 (22 CE, 22 Control)	Entrenamiento de fuerza del miembro no operado (3-5 RM, prensas, extensiones y flexiones isquiotibiales, 3 días por 8 semanas). Control realiza estiramientos simulados.	Fuerza pico de cuádriceps (QPF), fuerza de isquiotibiales (HPF), tasa de desarrollo de fuerza (RFD), simetría interextremidad (ILS).	Dinamómetro isométrico a 30° flexión, salto unipodal por distancia (HOP), escala IKDC.	Atenuación significativa de la pérdida de fuerza del cuádriceps: El grupo CE mostró una reducción de fuerza en la pierna operada de solo 16.6% a las 10 semanas frente al 32.0% en el grupo control (p=0.004). A las 24 semanas se mantuvo una ventaja del 14% a favor del grupo CE. El LSI de cuádriceps (86%) no difirió entre grupos, sobreestimando la capacidad física al enmascarar déficits absolutos de fuerza.
Zult, T., et al. (2018)	n=43 (22 Exp, 21 Control)	Entrenamiento de fuerza del cuádriceps no lesionado (8-12 RM en prensa y extensión, 3 series x 2 días por 12 semanas) añadido a rehabilitación estándar.	Torque máximo de cuádriceps e isquiotibiales (isométrico y dinámico a 60°, 120°, 180°/s), simetría (LSI), distancia de salto unipodal.	Dinamómetro isocinético Biodex, test de salto unipodal por distancia, escala Hughston Clinic Knee (HCK).	Ausencia de efecto adicional por educación cruzada: No se observaron diferencias en la función percibida (HCK) ni en el torque extensor/flexor entre grupos a las 5, 12 o 26 semanas, el déficit de cuádriceps en la extremidad operada pasó de 38% a una ganancia de 5-13% en ambos grupos por efecto de la rehabilitación general. La dosis de entrenamiento contralateral fue insuficiente para generar transferencia adicional.
Harput, G., et al. (2018)	n=48 (16 CE Concéntrico, 16 CE Excéntrico, 16 Control)	Entrenamiento isocinético concéntrico o excéntrico del miembro sano a 60°/s (3 series por 12 rep, 3 días por 8 semanas, semanas 4-12 post-quirúrgicas).	Fuerza máxima voluntaria isométrica (MVIC) de cuádriceps en ambas extremidades, simetría muscular (LSI).	Dinamómetro isocinético IsoMed 2000 a 60° flexión, salto unipodal (OLHDT), escala IKDC.	Mejora drástica en la recuperación de fuerza del cuádriceps: Tanto el grupo concéntrico como el excéntrico mostraron una ganancia de fuerza significativamente mayor en la pierna operada a las 12 y 24 semanas en comparación con el control (p< 0.05). Las ganancias de fuerza en el miembro operado fueron un 28% (concéntrico) y un 31% (excéntrico) superiores al control a la semana 24. No hubo diferencias entre tipos de contracción.

Liu, C., et al. (2025)	n = 40 (20 CE Experimental, 20 Control)	Entrenamiento neuromuscular de educación cruzada en la extremidad sana (control dinámico de balance progresivo, 6 semanas, 3 días/semanas) iniciado a las 5-6 semanas post-ACLR.	Cinemática de marcha (longitud, velocidad, ancho de zancada), trayectoria del centro de presiones (COP), activación electromiográfica (sEMG), presiones plantares.	Sistema de presiones plantares Zebris, sEMG inalámbrico (recto femoral), escala Lysholm, goniometría de ROM.	Optimización del control neuromuscular y la marcha: El grupo CE mostró mejoras superiores en la puntuación Lysholm (p<0.01), ROM articular (p<0.01) y activación electromiográfica del recto femoral (p<0.01). Además, redujo el ancho de zancada y el desplazamiento medial-lateral del COP, mejorando la distribución de presión plantar en antepié y talón (p<0.05).
Karimijashni, M., et al. (2023)	n=30 atletas (15 CE Intervención, 15 Control)	Ejercicios neuromusculares progresivos en la rodilla sana durante 8 semanas en fase temprana post-ACLR.	Equilibrio dinámico y estático en la rodilla operada, intensidad del dolor percibido, capacidad funcional.	Star Excursion Balance Test (SEBT), Balance Error Scoring System (BESS), prueba de apoyo en cigüeña, escala Lysholm, EVA.	Mejora del equilibrio dinámico, estático y reducción del dolor: El grupo con entrenamiento contralateral aumentó las distancias de alcance en SEBT (direcciones anterior, posterior, posteromedial y posterolateral; p<0.01), redujo los errores en el BESS en superficies firmes y de espuma (p<0.05), incrementó el tiempo en la postura de cigüeña (p=0.044) y disminuyó el dolor articular (p=0.014).
Xu, S., et al. (2023)	n=153 cirujanos ortopedistas (miembros AOSSM)	Encuesta observacional sobre criterios y protocolos de retorno al deporte (RTS) post-reconstrucción del LCA.	Criterios de simetría de fuerza extensora, índice de simetría de extremidades (LSI), tiempo postoperatorio y pruebas funcionales de salto.	Cuestionario estructurado multisección (survey clínico nacional AOSSM).	La mayoría de los cirujanos fundamenta el alta deportiva en el tiempo transcurrido combinado con un LSI de fuerza de cuádriceps >90% y pruebas de salto unipodal. El estudio evidencia una marcada falta de estandarización objetiva en las evaluaciones biomecánicas de alta, reforzando la necesidad de integrar estrategias cuantificables para reducir relesiones.
Capin, J., et al. (2019)	n=39 mujeres atletas	Entrenamiento de fuerza, agilidad, pliometría y prevención secundaria con perturbación (SAPP+PERT) vs sin perturbación (SAPP) por 10 sesiones.	Cinemática y cinética 3D de marcha (ángulo de flexión pico de rodilla [PKFA], momentos extensores internos, fuerza de contacto compartimento medial).	Análisis cinemático y cinético 3D de marcha sobre el suelo, modelo musculoesquelético impulsado por sEMG a los 1 y 2 años post-ACLR.	Resolución temporal de las asimetrías cinemáticas: Ninguno de los programas (SAPP o SAPP+PERT) modificó de forma inmediata las asimetrías en la flexión de rodilla durante la marcha. Las asimetrías biomecánicas persistieron al año postoperatorio, pero se resolvieron globalmente a los 2 años en ambos grupos (p<0.05), indicando que la recuperación cinemática requiere un tiempo prolongado.
Li, S., et al. (2025)	n=32 (16 NMES + Convencional, 16 Convencional solo)	Estimulación eléctrica neuromuscular (NMES 20 Hz) superpuesta a ejercicios de cadena cinética abierta de cuádriceps (90°-30°-90°), 6 semanas.	Fuerza de cuádriceps (MVIC a 90°), dinámica de marcha (fuerza de reacción vertical pico [PvGRF], presión pico en talón medial HM y lateral HL, impulsos del pie).	Dinamómetro isométrico ISOMED 2000, sistema de presiones plantares en marcha, escala Lysholm.	Mayor ganancia de fuerza y carga dinámica de marcha: El grupo NMES superpuesto obtuvo mayores incrementos en MVIC de cuádriceps (p<0.001, d=2.93), Lysholm (p=0.049, d = 2.06) y carga vertical pico (PvGRF p = 0.019, d=0.62) a las 14 semanas. Ambos grupos mostraron una transición de impulso de retropié a antepié representativo de marcha de evitación del cuádriceps.

Zheng, Q., et al. (2026)	n=43 (21 BFR, 22 Sham-BFR)	Entrenamiento de resistencia de baja carga (30% 1RM) con restricción del flujo sanguíneo (40% AOP) vs presión simulada (Sham) en semanas 13-20 post-ACLR.	Fuerza isométrica de extensores/flexores de rodilla, grosor muscular de cuádriceps, control postural dinámico, amplitud electromiográfica (sEMG).	Dinamómetro manual (HHD), ecografía muscular, Y-Balance Test (YBT), sEMG (RMS de recto femoral, vasto lateral y vasto medial) a las 24 semanas.	Mejora en resultados funcionales, fuerza y activación sEMG: A las 24 semanas postoperatorias, el grupo BFR presentó puntuaciones superiores en IKDC (p<0.01), Tegner (p<0.01), fuerza isométrica (p<0.05), Y-Balance Test (p<0.05) y amplitud sEMG de los tres vastos (p<0.05). No se detectaron diferencias en el grosor muscular ni en el ROM.
Sevinc, C., et al. (2024)	n=24 varones (13 CE+BFR, 11 CE solo)	Entrenamiento excéntrico isocinético contralateral a 60°/s (3 series x 12 rep, 2 días/semanas x 8 semanas) combinado con BFR vs CE solo.	Fuerza isométrica de cuádriceps, grosor muscular del recto femoral, vasto lateral y vasto medial oblicuo, área de sección transversal (CSA).	Dinamómetro isocinético a las 4 y 12 semanas post-ACLR, ecografía muscular de alta resolución.	Falta de beneficio aditivo del BFR al entrenamiento cruzado: La adición de BFR al entrenamiento de educación cruzada excéntrico no generó diferencias en la fuerza ni en la hipertrofia del cuádriceps en comparación con el CE solo (p>0.05). Ambos grupos incrementaron la fuerza y el grosor muscular de forma similar a la semana 12 (LSI de fuerza aumentó de ~50% a 72-75%).
Ashour, A., et al. (2024)	n=42 hombres	Secuencia de rehabilitación iniciando con entrenamiento de articulación del tobillo seguido de rodilla (Grupo B) vs rodilla seguida de tobillo (Grupo A).	Torque isocinético de extensión y flexión de rodilla durante la fase de apoyo del ciclo de marcha.	Análisis de laboratorio de marcha con plataformas de fuerza y sistemas de captura tridimensional.	Superioridad de la secuencia tobillo-primero: Iniciar la rehabilitación entrenando la articulación del tobillo antes que la rodilla (Grupo B) produjo mejoras mayores en los torques extensores y flexores de la rodilla durante la fase de apoyo de la marcha (p=0.001, Cohen d =0.97) en comparación con el orden tradicional.
Fu, S., et al. (2025)	n = 25 (grupos Ortesis BRACE, Placebo y Control)	Uso de una rodillera con restricción de extensión durante las actividades de la vida diaria por 36 semanas post-ACLR.	Ángulo máximo de flexión de rodilla, momento extensor, fuerza de reacción vertical del suelo (vGRF), índice de diferencia interextremidad (ILD).	Análisis biomecánico 3D de marcha y carrera a las 12 y 48 semanas post-ACLR.	Reducción de asimetrías cinemáticas en marcha: El grupo con ortesis aumentó el ángulo máximo de flexión de rodilla en la pierna operada (p=0.025, ES=0.207) y redujo la asimetría cinemática de flexión en la marcha a las 48 semanas (p=0.014, ES= -1.025). Los efectos sobre la cinética y en la tarea de carrera fueron limitados.
Erickson, L., et al. (2024)	n=48 atletas (20 mujeres/28 hombres)	Entrenamiento de baja carga con BFRT activo vs BFRT simulado (placebo) aplicado 1 mes pre-cirugía y 4-5 meses post-cirugía.	Fuerza isométrica/isocinética de cuádriceps, RFD, área de sección transversal muscular (MRI), histofisiología (biopsia de vasto lateral), biomecánica de marcha 3D.	Dinamómetro isocinético, RM musculoesquelética, biopsia tisular de vasto lateral, análisis tridimensional de marcha.	Ausencia de ventaja clínica del BFRT frente al placebo: No se registraron diferencias entre el grupo BFRT activo y el grupo simulado en fuerza muscular, hipertrofia muscular, arquitectura de fibras ni momentos extensores de rodilla (p>0.05). Los autores enfatizan evaluar la relación costo-beneficio del BFRT.

Fuente: *Elaboración propia*

Discusión

La presente revisión demuestra que el entrenamiento de fuerza contralateral constituye una herramienta prometedora para mitigar la atrofia por inhibición artrogénica muscular y acelerar la recuperación de la fuerza del cuádriceps en las fases iniciales posteriores a la reconstrucción del ligamento cruzado anterior (RLCA). Minshull, C., et al. (2021) demostraron que la aplicación de una dosis de alta intensidad (3–5 RM) en la extremidad sana atenuó significativamente la pérdida de fuerza isométrica del cuádriceps en la pierna operada a las 10 semanas. En concordancia, Harput, G., et al. (2018) observaron que el entrenamiento isocinético contralateral, tanto concéntrico como excéntrico a 60°/s iniciado a la cuarta semana post-quirúrgica, incrementó la fuerza del cuádriceps en el miembro intervencionado en un 28% y 31% adicional con respecto al grupo control a las 24 semanas. Sin embargo, la magnitud de esta transferencia neural depende de la intensidad y carga del estímulo; Zult, T., et al. (2018) no hallaron beneficios adicionales sobre la fuerza extensora o la capacidad funcional percibida al emplear un protocolo guiado por parámetros de hipertrofia moderada (8–12 RM), concluyendo que cargas insuficientes no activan adecuadamente las vías corticoespinales interhemisféricas requeridas. Adicionalmente, al explorar la interacción con tecnologías coadyuvantes, Sevinc, C., et al. (2024) identificaron que la adición de restricción del flujo sanguíneo (BFR) al entrenamiento excéntrico contralateral no generó un beneficio aditivo significativo en la fuerza ni en el grosor muscular del cuádriceps en comparación con el entrenamiento cruzado aislado.

A nivel neurofisiológico y funcional, el entrenamiento contralateral estimula la excitabilidad motora interhemisférica y atenúa los mecanismos de inhibición muscular central, influyendo en la estabilidad dinámica del miembro lesionado. Liu, C., et al. (2025) registraron que el entrenamiento contralateral centrado en el control dinámico no solo incrementó la activación electromiográfica del recto femoral, sino que modificó cuantitativamente la biomecánica de la marcha al aumentar la longitud de zancada, reducir el ancho de paso y acortar el desplazamiento medial-lateral del centro de presiones (COP), optimizando la distribución de carga en el antepié y retropié, en el plano del control postural, Karimijashni, M., et al. (2023) reportaron mejoras significativas en el equilibrio dinámico evaluado mediante la prueba Star Excursion Balance Test (SEBT) en múltiples direcciones y en la estabilidad estática unipodal.

Por su parte, Li, S., et al. (2025) evidenciaron que la superposición de estimulación eléctrica neuromuscular (NMES) sobre ejercicios de cadena cinética abierta incrementó la carga vertical pico (PvGRF) y la presión plantar en la marcha, al tiempo que identificaron una transición del impulso del retropié al antepié representativa del patrón adaptativo de evitación del cuádriceps. No obstante, desde un rigor biomecánico estricto, es crítico distinguir entre los parámetros cinéticos o cinemáticos medidos de forma directa y las meras inferencias teóricas: un incremento aislado en la fuerza máxima del cuádriceps no implica de forma automática la normalización de los patrones de movimiento dinámico ni la corrección de los momentos extensores articulares. Por ejemplo, Fu, S., et al. (2025) observaron que el uso de una ortesis de restricción de extensión redujo significativamente la asimetría del ángulo máximo de flexión de la rodilla en la fase de apoyo de la marcha, pero sus efectos sobre la

cinética tridimensional y las tareas de mayor exigencia biomecánica como la carrera fueron sumamente limitados, demostrando la disociación entre la capacidad muscular y la ejecución cinemática.

Las discrepancias detectadas entre las investigaciones se explican por las notables variaciones en los protocolos de intervención, las ventanas temporales postoperatorias y los instrumentos de evaluación aplicados. Capin, J., et al. (2019) demostraron que las asimetrías cinemáticas y cinéticas de la rodilla durante la marcha incluyendo la reducción del ángulo de flexión pico y de los momentos extensores internos persisten hasta 1 y 2 años postoperatorios, incluso en atletas que han resuelto completamente sus déficits de fuerza e índices de simetría muscular (LSI > 90%), lo que ratifica que la restauración de la fuerza no garantiza la normalidad biomecánica en tareas funcionales. En cuanto a la secuencia articular en los programas de ejercicio, Ashour, A., et al. (2024) probaron que priorizar el entrenamiento de la articulación del tobillo antes de la rodilla genera incrementos superiores en los torques de flexo-extensión de la rodilla durante la marcha en comparación con el orden convencional, resaltando la influencia de la cadena cinética distal en la mecánica de la rodilla. Asimismo, Zheng, Q., et al. (2026) al evaluar la inclusión de BFR de baja carga en etapas intermedias (semanas 13–20 post-RLCA) hallaron mejoras significativas en la fuerza isométrica, la puntuación funcional IKDC, el control postural dinámico y la amplitud de sEMG de los vastos a las 24 semanas, aunque sin evidenciar cambios significativos en el grosor muscular ni en el rango de movimiento articular, lo que subraya la naturaleza predominantemente neural de las adaptaciones obtenidas.

A pesar de los hallazgos alentadores, la evidencia analizada presenta limitaciones metodológicas sustanciales que deben considerarse al extrapolar sus resultados a la clínica, destacan los reducidos tamaños muestrales en la mayoría de los ensayos aleatorizados, la heterogeneidad en el tipo de injerto autólogo utilizado y la marcada escasez de mediciones biomecánicas directas en tres dimensiones frente al predominio de evaluaciones isométricas unipodales. De acuerdo con Xu, S., et al. (2023), existe una marcada falta de estandarización en los criterios clínicos de alta y retorno al deporte a nivel internacional, donde la mayoría de cirujanos ortopedistas continúa basándose en lapsos cronológicos (6–9 meses) e índices de simetría de fuerza (LSI > 90%), a pesar de que el LSI a menudo sobreestima la función real al enmascarar déficits bilaterales severos. Finalmente, Erickson, L., et al. (2024) advierten en un ensayo aleatorizado controlado con placebo que la adición de BFRT de baja carga no ofreció ventajas superiores al tratamiento simulado en fuerza, área de sección transversal por resonancia magnética, histofisiología ni biomecánica de marcha 3D, instando a los profesionales de la salud a valorar críticamente la relación costo-beneficio de las terapias adyuvantes. En conclusión, el entrenamiento cruzado contralateral debe integrarse como un coadyuvante neurofisiológico temprano para preservar el impulso corticoespinal y atenuar la debilidad, sin asumir falsamente que el restablecimiento de la fuerza resuelve por sí solo las alteraciones cinemáticas y cinéticas complejas del movimiento humano.

Conclusiones

La evidencia actual indica que el entrenamiento cruzado contralateral atenúa de forma modesta a moderada los déficits tempranos de fuerza en el cuádriceps tras la reconstrucción del

ligamento cruzado anterior, siempre que se empleen cargas elevadas, no obstante, sus efectos varían según la intensidad del protocolo y el tiempo postoperatorio. Biomecánicamente, la evidencia muestra mejoras en el equilibrio dinámico y la distribución de presiones plantares en la marcha, pero los efectos directos sobre la cinemática tridimensional y la cinética articular de la rodilla son heterogéneos y limitados. Clínicamente, el entrenamiento contralateral constituye una herramienta coadyuvante neurofisiológica valiosa para atenuar la inhibición muscular inicial sin sobrecargar el injerto. Sin embargo, no debe presuponerse que las ganancias de fuerza restauren automáticamente la mecánica compleja del movimiento, requiriéndose evaluaciones biomecánicas objetivas para guiar el retorno seguro al deporte.

Bibliografias

Ashour, A., Elhafez, S., ElMeligie, M., & Hanafy, A. (2024). Crossover effect of knee and ankle joint training on knee mechanics after ACL reconstruction: A randomized controlled trial. Gait & Posture, 113, 512–518. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2024.08.011

Badawy, C., Jan, K., Beck, E., Fleet, N., Taylor, J., Ford, K., & Waterman, B. (2022b). Contemporary principles for postoperative rehabilitation and return to sport for athletes undergoing anterior cruciate ligament reconstruction. Arthroscopy Sports Medicine and Rehabilitation, 4(1), e103–e113. https://doi.org/10.1016/j.asmr.2021.11.002

Brinlee, A., Dickenson, S., Hunter-Giordano, A., & Snyder-Mackler, L. (2021). ACL Reconstruction Rehabilitation: Clinical data, Biologic Healing, and Criterion-Based Milestones to inform a Return-to-Sport Guideline. Sports Health a Multidisciplinary Approach, 14(5), 770–779. https://doi.org/10.1177/19417381211056873

Brown, C., Marinko, L., LaValley, M., & Kumar, D. (2021). Quadriceps Strength after anterior cruciate ligament reconstruction Compared with uninjured Matched Controls: A Systematic review and Meta-analysis. Orthopaedic Journal of Sports Medicine, 9(4), 2325967121991534. https://doi.org/10.1177/2325967121991534

Calvert, G., & Carson, R. (2021). Neural mechanisms mediating cross education: With additional considerations for the ageing brain. Neuroscience & Biobehavioral Reviews, 132, 260–288. https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.11.025

Capin, J., Zarzycki, R., Ito, N., Khandha, A., Dix, C., Manal, K., Buchanan, T., & Snyder-Mackler, L. (2019). GAIT Mechanics in women of the ACL-SPORTS Randomized control Trial: Interlimb symmetry improves over time regardless of treatment group. Journal of Orthopaedic Research®, 37(8), 1743–1753. https://doi.org/10.1002/jor.24314

Daggett, M., Witte, K., Cabarkapa, D., Cabarkapa, D., & Fry, A. (2022). Evidence-Based Data Models for Return-to-Play Criteria after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Healthcare, 10(5), 929. https://doi.org/10.3390/healthcare10050929

Erickson, L., Owen, M., Casadonte, K., Janatova, T., Lucas, K., Spencer, K., Brightwell, B., Graham, M., White, M., Thomas, N., Latham, C., Jacobs, C., Conley, C., Thompson, K., Johnson, D., Hardy, P., Fry, C., & Noehren, B. (2024). The Efficacy of Blood Flow Restriction Training to Improve Quadriceps Muscle Function after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. Medicine & Science in Sports & Exercise, 57(2), 227–237. https://doi.org/10.1249/mss.0000000000003573

Figueroa, D., Arce, G., Espregueira-Mendes, J., Maestu, R., Mosquera, M., Williams, A., Parker, D., Cohen, M., Karahan, M., Perea, G., Zaffagnini, S., Neyret, P., Karlsson, J.,

Musahl, V., Radice, F., Van Der Merwe, W. M., Landreau, P., Imhoff, A., Menetrey, J., Patnaik, S. (2022). Return to sport soccer after anterior cruciate ligament reconstruction: ISAKOS consensus. Journal of ISAKOS Joint Disorders & Orthopaedic Sports Medicine, 7(6), 150–161. https://doi.org/10.1016/j.jisako.2022.08.004

Fu, S., Shi, H., Yu, Y., Huang, H., Liu, H., & Ao, Y. (2025). Effects of knee extension constraint training on knee and loading asymmetry during walking and running after unilateral ACL reconstruction: A pilot randomized clinical trial. Gait & Posture, 122, 175–182. https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2025.07.311

Glattke, K., Tummala, S., & Chhabra, A. (2021). Anterior cruciate ligament reconstruction recovery and rehabilitation. Journal of Bone and Joint Surgery, 104(8), 739–754. https://doi.org/10.2106/jbjs.21.00688

Harput, G., Ulusoy, B., Yildiz, T., Demirci, S., Eraslan, L., Turhan, E., & Tunay, V. (2018). Cross-education improves quadriceps strength recovery after ACL reconstruction: a randomized controlled trial. Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy, 27(1), 68–75. https://doi.org/10.1007/s00167-018-5040-1

Karimijashni, M., Sarvestani, F., & Yoosefinejad, A. (2023). The effect of contralateral knee neuromuscular exercises on static and dynamic balance, knee function, and pain in athletes who underwent anterior cruciate ligament reconstruction: a Single-Blind randomized controlled trial. Journal of Sport Rehabilitation, 32(5), 524–539. https://doi.org/10.1123/jsr.2021-0380

Koc, B., Schotanus, M., Ehlen, T., Truyens, A., De Bie, R., & Jansen, E. (2026). Low-Load blood flow restriction training as an alternative to Heavy-Load resistance training In Early-Stage rehabilitation following Bone–Patellar Tendon–Bone anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. JOSPT Open., 4(2), 166–173. https://doi.org/10.2519/josptopen.2026.0185

Kotsifaki, R., Korakakis, V., King, E., Barbosa, O., Maree, D., Pantouveris, M., Bjerregaard, A., Luomajoki, J., Wilhelmsen, J., & Whiteley, R. (2023). Aspetar clinical practice guideline on rehabilitation after anterior cruciate ligament reconstruction. British Journal of Sports Medicine, 57(9), 500–514. https://doi.org/10.1136/bjsports-2022-106158

Li, S., Lu, B., Zhang, Y., Liu, J., Xu, W., & Li, Q. (2025). The effect of neuromuscular electrical stimulation superimposed on quadriceps training on gait dynamics after anterior cruciate ligament reconstruction. Journal of Back and Musculoskeletal Rehabilitation, 38(1), 139–147. https://doi.org/10.1177/10538127241296376

Liu, C., Li, S., Li, J., Zhang, H., Li, G., & Jiang, X. (2025). The effects of contralateral limb cross-education training on post-surgical rehabilitation outcomes in patients with anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled trial. Journal of Orthopaedic Surgery and Research, 20(1), 118. https://doi.org/10.1186/s13018-024-05430-3

Minshull, C., Gallacher, P., Roberts, S., Barnett, A., Kuiper, J. H., & Bailey, A. (2021). Contralateral strength training attenuates muscle performance loss following anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction: a randomised-controlled trial. European Journal of Applied Physiology, 121(12), 3551–3559. https://doi.org/10.1007/s00421-021-04812-3

Sajedi, H., Aydın, E., Güler, M., Akpınar, S., Esmaeili, A., Jafarnezhadgero, A., & Webster, K. (2025). Gait Biomechanical Differences in the Anterior Cruciate Ligament Reconstructed and Contralateral Limb: A Systematic Review with Meta-Analysis. Healthcare, 13(24), 3304. https://doi.org/10.3390/healthcare13243304

Sevinc, C., Gürler, V., Harput, G., Ocguder, A., Ergen, F., & Tunay, V. (2024). Blood flow restriction training with cross education for

quadriceps muscle recovery after anterior cruciate ligament reconstruction: A prospective, randomized, controlled, single-blind clinical trial. Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy, 33(9), 3088–3097. https://doi.org/10.1002/ksa.12553

Solie, B., Carlson, M., Doney, C., Kiely, M., & LaPrade, R. (2024). Oh, My Quad: A Clinical Commentary And Evidence-Based Framework for the Rehabilitation of Quadriceps Size and Strength after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. International Journal of Sports Physical Therapy, 19(12), 1600–1628. https://doi.org/10.26603/001c.126191

Voskuil, C., Andrushko, J., Huddleston, B., Farthing, J., & Carr, J. (2023). Exercise prescription and strategies to promote the cross-education of strength: a scoping review. Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 48(8), 569–582. https://doi.org/10.1139/apnm-2023-0041

Xu, S., Cheema, S., Tarakemeh, A., Randall, J., Bechtold, M., Mullen, S., Schroeppel, P., Mulcahey, M., & Vopat, B. (2023). Return to sport after primary anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction: A survey of the American Orthopaedic Society for Sports Medicine. Kansas Journal of Medicine, 16(1), 105–109. https://doi.org/10.17161/kjm.vol16.18617

Zheng, Q., Chen, L., Zhu, Y., Wang, R., & Chen, P. (2026). Blood flow restriction as an adjunct during mid-stage rehabilitation after ACL reconstruction: a randomized sham-controlled study. BMC Musculoskeletal Disorders, 27(1). https://doi.org/10.1186/s12891-026-09908-5

Zult, T., Gokeler, A., Van Raay, J., Brouwer, R., Zijdewind, I., Farthing, J., & Hortobágyi, T. (2018). Cross-education does not improve early and late-phase rehabilitation outcomes after ACL reconstruction: a randomized controlled clinical trial. Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy, 27(2), 478–490. https://doi.org/10.1007/s00167-018-5116-y

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Jorge Paul López Acosta, Lizbeth Salomé Maldonado García, Andrea Estefanía Marín Cordero, Erick Steve Jordán Cruz y Katherine Guadalupe Jordán Cruz.

Declaraciones éticas y editoriales del artículo

Contribución de los autores (Taxonomía CRediT)

Jorge Paul López Acosta, Lizbeth Salomé Maldonado García: conceptualización de la investigación, diseño metodológico, desarrollo del proceso investigativo, análisis formal de los datos, redacción del borrador original del manuscrito, revisión crítica del contenido científico y supervisión general del estudio.

Andrea Estefanía Marín Cordero, Erick Steve Jordán Cruz: curación y organización de los datos, participación en la recolección de información, validación de los resultados obtenidos y elaboración de representaciones gráficas y visualización de los datos.

Katherine Guadalupe Jordán Cruz: provisión de recursos académicos y materiales para el desarrollo del estudio, apoyo en la administración del proyecto investigativo y revisión editorial del manuscrito antes de su publicación.

Declaración de conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses en relación con la investigación presentada, la autoría del manuscrito ni la publicación del presente artículo.

Declaración de financiamiento

La presente investigación no recibió financiamiento específico de agencias públicas, comerciales o de organizaciones sin fines de lucro. En caso de existir financiamiento institucional o externo, este deberá ser declarado explícitamente por los autores en esta sección.

Declaración del editor

El editor responsable certifica que el proceso editorial del presente artículo se desarrolló conforme a los principios de integridad científica, transparencia y buenas prácticas editoriales. El manuscrito fue sometido a un proceso de evaluación mediante revisión por pares doble ciego, garantizando la confidencialidad de la identidad de los autores y revisores durante todo el proceso de dictamen académico. Asimismo, el editor declara que el artículo cumple con los criterios científicos, metodológicos y éticos establecidos por la revista.

Declaración de los revisores

Los revisores externos que participaron en la evaluación del presente manuscrito declaran haber realizado el proceso de revisión de manera objetiva, independiente y confidencial. Asimismo, manifiestan que no mantienen conflictos de interés con los autores ni con la investigación evaluada, y que sus observaciones y recomendaciones se fundamentan exclusivamente en criterios científicos, metodológicos y académicos.

Declaración ética de la investigación

Los autores declaran que la investigación se desarrolló respetando los principios éticos de la investigación científica, garantizando la confidencialidad de los datos y el respeto a los participantes del estudio. En los casos en que la investigación involucre seres humanos, los procedimientos deben ajustarse a los principios éticos establecidos en la Declaración de Helsinki y a las normativas institucionales correspondientes.

Declaración sobre el uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que el uso de herramientas de inteligencia artificial, en caso de haberse utilizado durante el proceso de investigación o redacción del manuscrito, se realizó únicamente como apoyo técnico para mejorar la claridad del lenguaje o el análisis de información, manteniendo siempre la

responsabilidad intelectual sobre el contenido del artículo. Las herramientas de inteligencia artificial no fueron utilizadas como autoras del manuscrito ni sustituyen la responsabilidad académica de los investigadores.

Disponibilidad de datos

Los datos que respaldan los resultados de esta investigación estarán disponibles previa solicitud razonable al autor de correspondencia, respetando las normas éticas y de confidencialidad establecidas por la investigación.