

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ

FACULTAD DE MEDICINA

TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN FISIOTERAPIA



“EFICACIA DE LA RESTRICCIÓN DE FLUJO SANGUÍNEO EN PACIENTES TRAS LA
RECONSTRUCCIÓN QUIRÚRGICA DE LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR: UNA
REVISIÓN SISTEMÁTICA Y METANÁLISIS”

Autor: Vilaplana Torregrosa Alejandro

Tutor: José Vicente Toledo Marhuenda

Cotutor: José Vicente Segura Heras

Departamento: Patología y cirugía

Departamento: Estadística, Matemáticas e
Informática

Curso académico 2024/2025

Convocatoria de Junio



ÍNDICE

1. RESUMEN /ABSTRACT	5
2. INTRODUCCIÓN	7
3. OBJETIVOS	9
3.1. Objetivo Principal	9
3.2. Objetivo Secundario.....	9
4. MATERIALES Y MÉTODOS	10
4.1. Protocolo de Registro	10
4.2. Estrategia de Búsqueda	10
4.3. Criterios de elección	10
4.4. Selección de estudios y recolección de datos	11
4.5. Variables	11
4.6. Riesgo de sesgo y evaluación de la calidad	11
4.7. Síntesis y análisis de datos	11
5. RESULTADOS	13
5.1. Selección de estudios	13
5.2. Características de los estudios	13
5.3. Riesgo de sesgo y evaluación de la calidad	14
5.4. Síntesis de resultados	14
6. DISCUSIÓN	17
6.1. Respecto a la Fuerza	17
6.2. Respecto a la Hipertrofia	19

6.3. Respecto a la Funcionalidad	20
7. LIMITACIONES	22
8. CONCLUSIÓN	23
Material suplementario	24
Contribuciones de autores	24
Financiación	24
Conflicto de intereses	24
9. REFERENCIAS	25
10. ANEXOS	30
11. FIGURAS Y TABLAS.....	40



1. RESUMEN / ABSTRACT

Objetivo. Evaluar la eficacia del entrenamiento con restricción del flujo sanguíneo (BFR) frente a intervenciones sin BFR, aplicado tras la reconstrucción del ligamento cruzado anterior (RLCA) midiendo la fuerza, hipertrofia y funcionalidad de rodilla.

Métodos. Se realizaron búsquedas en PubMed y Embase entre noviembre de 2024 y marzo de 2025. El riesgo de sesgo se evaluó mediante la herramienta Cochrane Risk of Bias y la calidad metodológica con la escala (PEDro).

Resultados. La búsqueda arrojó 30 ensayos clínicos aleatorizados. Un total de 8 estudios fueron incluidos en el análisis cualitativo y 5 en el cuantitativo. El grupo BFR mostró mejoras significativas en la fuerza ($p=0.031$), habiendo una disminución significativa de la fuerza extensora en el grupo sin BFR (SMD = 0.77; IC 95%: [0.36, 1.19]). Respecto a la hipertrofia, se observaron aumentos relevantes en el grosor del cuádriceps (SMD = 0.57; IC 95%: [-0.93,-0.21]) sin diferencias significativas ($p=0.314$). Se hallaron beneficios en la funcionalidad (SMD = -1.94; IC 95%: [-3.31,-0.60]), sin diferencias entre grupos ($p=0.082$) a favor del BFR (SMD= -2.91; IC 95%: [-5.21, -0.60]).

Conclusión: El BFR puede ser una estrategia útil para optimizar la rehabilitación postquirúrgica del LCA, especialmente en las fases iniciales. No obstante, se requieren más estudios con mayor homogeneidad metodológica.

Palabras clave: “Blood Flow Restriction Therapy”, “ACL”, “Occlusion training”, “Vascular occlusion”, “Anterior cruciate ligament injury” y “Knee ligament injury”.

Objective: To evaluate the effectiveness of blood flow restriction (BFR) training compared to non-BFR interventions following anterior cruciate ligament reconstruction (ACLR), by measuring knee strength, hypertrophy, and functionality.

Methods: Searches were conducted in PubMed and Embase between November 2024 and March 2025. Risk of bias was assessed using the Cochrane Risk of Bias tool, and methodological quality was evaluated using the PEDro scale.

Results: The search yielded 30 randomized controlled trials. A total of 8 studies were included in the qualitative analysis and 5 in the quantitative analysis. The BFR group showed significant improvements in strength ($p = 0.031$), while a significant decrease in extensor strength was observed in the non-BFR group (SMD = 0.77; IC 95%: [0.36, 1.19]). Regarding hypertrophy, relevant increases were observed in quadriceps thickness (SMD = 0.57; 95% CI: [-0.93, -0.21]), though not statistically significant ($p = 0.314$). Benefits in functionality were found (SMD = -1.94; 95% CI: [-3.31, -0.60]), with no significant differences between groups ($p = 0.082$), in favor of BFR (SMD = -2.91; 95% CI: [-5.21, -0.60]).

Conclusion: BFR may be a useful strategy to optimize post-surgical ACL rehabilitation, especially in the early phases. However, further studies with greater methodological homogeneity are needed.

Keywords: “Blood Flow Restriction Therapy”, “ACL”, “Occlusion training”, “Vascular occlusion”, “Anterior cruciate ligament injury”, and “Knee ligament injury”.



2. INTRODUCCIÓN

Las lesiones de ligamento cruzado anterior (LCA) son las más frecuentes y de mayor impacto en el ámbito deportivo. Este ligamento, es uno de los 4 principales de la rodilla y desempeña un papel crucial en la estabilidad articular, controlando los movimientos de rotación y el desplazamiento anterior de la tibia respecto al fémur. Su ruptura suele ser consecuencia de movimientos bruscos, como cambios rápidos de aceleración, giros sobre una pierna apoyada, caídas mal controladas o impactos directos en la articulación (1-3).

A nivel global, se estima que ocurren entre 100,000 y 200,000 lesiones de LCA en deportistas cada año (4). Por ejemplo, en España, en la Liga Española de Fútbol se sufre una media de 11 roturas de LCA por temporada (5). Esta lesión, además de ser compleja en su recuperación, implica varios factores críticos a considerar, como el dolor, el rango de movimiento articular, la inestabilidad y la fuerza de la rodilla entre otros.

Uno de los problemas más comunes tras la rotura del LCA es la atrofia muscular, que afecta aproximadamente al 30% de los casos a los seis meses post-cirugía, con un impacto directo en la fuerza extensora (6). Esta atrofia se asocia con una reducción del área de sección transversal (CSA) del músculo (7), parámetro que se asocia con la fuerza generada. Dado que el CSA refleja el tamaño muscular, su recuperación mediante hipertrofia es clave para mejorar la función muscular.

Tradicionalmente, los programas de entrenamiento de fuerza han empleado ejercicios de resistencia con cargas comprendidas entre el 60 y el 80 % de una repetición máxima (1RM), con el objetivo de inducir hipertrofia y aumentar la fuerza muscular (8). Sin embargo, diversas investigaciones han demostrado que el entrenamiento con cargas significativamente menores, en torno al 30 % del 1RM, también puede provocar adaptaciones musculares similares en términos de hipertrofia y fuerza (9,10).

Aun así, los mayores incrementos de fuerza se han observado con el uso de cargas más elevadas (11). Esto supone un reto en el contexto postquirúrgico, dado que muchos pacientes no están en condiciones de tolerar ese nivel de exigencia durante las primeras fases de rehabilitación. Por esta razón, resulta necesario explorar alternativas terapéuticas que ofrezcan resultados comparables, pero con menor carga mecánica.

Una intervención que podría encajar en esta búsqueda de alternativas en el ámbito de la rehabilitación del LCA con cargas bajas, es el entrenamiento con restricción de flujo sanguíneo (*Blood flow restriction*, BFR). Esta modalidad de rehabilitación implica el uso de dispositivos a modo de torniquete para reducir de manera controlada el flujo sanguíneo durante el ejercicio, generando adaptaciones similares a un ejercicio de alta intensidad, pero utilizando cargas más ligeras (12,13), este tipo de práctica puede resultar muy útil en pacientes postquirúrgicos que no toleran cargas elevadas durante las fases iniciales de rehabilitación.

Si bien existen estudios que demuestran el potencial del BFR para mejorar la fuerza y la masa muscular tras la cirugía de LCA, la evidencia es limitada. La poca cantidad de estudios al respecto, además de la alta variabilidad de los mismos en sus diseños metodológicos y su riesgo de sesgo (14), dificulta la construcción de una base científica sólida que pueda verse incluida y avalada dentro de las guías de práctica clínica sobre la rehabilitación del LCA.

Por ello, el objetivo de esta revisión sistemática con metaanálisis es recopilar y analizar la evidencia disponible sobre cómo afecta el entrenamiento con BFR a pacientes sometidos a cirugía de LCA centrándonos en la fuerza, hipertrofia y funcionalidad, con el fin de fomentar una base científica más sólida para poder tener en cuenta su efectividad y viabilidad en este contexto.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo principal

Evaluar la eficacia del entrenamiento con restricción del flujo sanguíneo (BFR) en comparación con intervenciones sin BFR, aplicado tras la reconstrucción del ligamento cruzado anterior (RLCA).

3.2. Objetivos secundarios

- Analizar las siguientes variables clínicas: fuerza muscular, hipertrofia y funcionalidad de la rodilla.
- Evaluar la calidad metodológica de los estudios relacionados con el BFR tras RLCA mediante la escala PEDro.
- Evaluar el riesgo de sesgo de los estudios relacionados con el BFR tras RLCA según la metodología Cochrane.
- Describir las características de los estudios seleccionados y realizar un metaanálisis de las variables clínicas mencionadas.



4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Protocolo de Registro

La revisión sistemática y metaanálisis se realizó siguiendo las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) (15) que se encuentra en el **anexo 1** y se incorporó en el registro prospectivo internacional de revisiones sistemáticas PROSPERO CRD420251047781 (16). El protocolo tiene la aprobación del Comité de Ética e Integridad en la Investigación (COIR) de la Universidad Miguel Hernández de Elche. TFG.GFI.JVTM.AVT.241130.

4.2 Estrategia de búsqueda

La búsqueda se realizó en PubMed y Embase entre noviembre de 2024 y marzo de 2025 utilizando las palabras clave: “Blood Flow Restriction Therapy”, “ACL”, “Occlusion training”, “Vascular occlusion”, “Anterior cruciate ligament injury” y “Knee ligament injury”. La metodología para realizar la ecuación de búsqueda se puede encontrar en el **anexo 2**.

Se utilizó el formato PICO para plantear la estrategia de búsqueda de la información: Population: Patients undergoing anterior cruciate ligament (ACL) reconstruction; Intervention: Blood Flow Restriction (BFR) training post-ACL surgery; Comparison: Patients treated with BFR after ACL surgery vs patients treated without BFR after ACL surgery; Outcomes: Strength, knee functionality, or hypertrophy; Limitations: Randomized controlled trials (RCTs), systematic reviews (SRs), and meta-analyses. La ecuación de búsqueda y el proceso de captación de información basada en la pregunta de investigación puede ser encontrada en el **anexo 3**.

4.3 Criterios de elección

Se incluyeron estudios que compararon la intervención BFR tras la reconstrucción de LCA, que no incluyeran sujetos sanos, y que analizaron fuerza, hipertrofia o funcionalidad de la rodilla. Los estudios debían estar en inglés o español y realizados en humanos vivos, además de que sólo se incluyeron estudios de ensayos clínicos aleatorizados (ECA).

4.4 Selección de estudios y recolección de datos

Los resultados fueron exportados a Microsoft Excel y organizados. Tras eliminar duplicados, dos revisores independientes (AVT y MLM), examinaron la bibliografía leyendo títulos y abstracts, para seleccionar aquellos que mejor encajaban en el estudio. Después, los mismos autores realizaron un análisis de texto completo para elegir aquellos estudios que mejor se ceñían a los criterios de elección. En caso de desacuerdo, un tercer evaluador (JVTM) resolvió el conflicto por consenso. Se usó el cociente de Cohen's Kappa para calcular el índice de acuerdo entre los dos principales revisores (AVT y MLM) para cada una de las bases de datos, la concordancia de los revisores se puede encontrar en la **tabla 1**, resultando en un índice de concordancia del 95,65% y un índice Kappa de 0.907 en el apartado title/abstract de RCT, en los demás apartados la concordancia fue del 100% y el índice Kappa de 1. Los datos fueron extraídos y organizados en tablas con información relevante sobre los estudios.

4.5. Variables

La fuerza fue la variable principal, mientras que las secundarias fueron la hipertrofia muscular y la funcionalidad de la rodilla, evaluada mediante los cuestionarios IKDC (International Knee Document Committee) (17) y Lysholm (18).

4.6. Riesgo de sesgo y evaluación de la calidad

Se evaluó el riesgo de sesgo utilizando la herramienta Cochrane Risk of Bias (Rob1), que clasifica el riesgo en bajo, con ciertas preocupaciones o alto (19). Además, se utilizó la escala PEDro para evaluar la calidad metodológica de los ECA incluidos en la búsqueda. La escala mide sobre diez cada estudio incluido, a mayor puntuación mejor calidad metodológica (20).

4.7. Síntesis y análisis de datos

Se empleó el programa R (21) para realizar el estudio de metaanálisis. Se ajustaron simultáneamente el modelo de efectos aleatorios y el modelo de efectos fijos y, se actualizaron en función de los tests de heterogeneidad.

Se utilizó el método de la varianza inversa para obtener el estimador del tamaño del efecto global y el estimador de Paule-Mandel del error aleatorio. El método Q se empleó para calcular el IC al 95% de este error y se aplicó la corrección de Hartung-Knapp en los modelos de efectos aleatorios.

Se utilizó la función `bc.mean.sd()` del paquete `estmeansd` para estimar la media y la desviación típica en los estudios que presentan la mediana, el rango intercuartílico y/o el rango.

La heterogeneidad fue analizada mediante el error aleatorio tau (τ), la prueba Q de Cochran, el valor muestral de Higgins y Thomson (I²) y el estadístico H asociado a la Q de Cochran. Se elegía el modelo de efectos aleatorios cuando alguna de estas pruebas era significativa. El tamaño del efecto global se estimó a partir del modelo seleccionado (fijo o aleatorio). El resumen de los resultados obtenidos se presenta mediante un Forest Plot.

La línea vertical central de esta representación es la línea de 'no efecto', la cual simboliza que no hay diferencia entre las medidas pre/post obtenidas. Dentro de la gráfica, los cuadrados representan el efecto evaluado en cada estudio y su tamaño está directamente relacionado con el peso de los estudios en el metaanálisis (expresado numéricamente en la columna Weight). La línea horizontal que los atraviesa representa el intervalo de confianza. Cuanto más larga sea la línea, mayor será el intervalo y, por tanto, los resultados del estudio serán menos precisos.

El diamante representa los resultados globales del metaanálisis. El centro del diamante es el valor del efecto en conjunto y el ancho representa el intervalo de confianza general.

5. RESULTADOS

5.1 Selección de estudios

Inicialmente se realizó una búsqueda de estudios primarios, identificando 30 ECA (PubMed=12, EMBASE=18). Tras la eliminación de duplicados, se evaluaron 21 registros, 14 pasaron a revisión completa y se incluyeron finalmente 6 ECA. Posteriormente, se realizó una búsqueda de revisiones sistemáticas para encontrar ECAs adicionales y se encontraron 30 revisiones sistemáticas potencialmente elegibles (PubMed=17, EMBASE=13). Tras eliminar duplicados, se revisaron 24 títulos y resúmenes, de los cuales 11 se seleccionaron para revisión completa, resultando en 10 revisiones sistemáticas que incluían 2 ECA de interés. En total, se analizaron 8 ECA, de los cuales 5 se incluyeron en el metaanálisis. La **figura 1** (diagrama PRISMA) detalla las etapas de selección.

5.2 Características de los estudios

Se incluyeron 275 pacientes, con una media de edad de 26 ± 6.47 años y predominio masculino (59,02%). Todos fueron intervenidos quirúrgicamente del LCA. Las características y variables se resumen en las **tablas 2 y 3**.

Respecto a los grupos de intervención y control, un estudio empleó SHAM como placebo en el grupo control (22); el resto no aplicó placebo. Dos estudios incluyeron más de un grupo experimental: Curran et al. (23) utilizaron 4 grupos (2 concéntricos, 2 excéntricos con y sin BFR), y Li et al. (24) usó 3 grupos (1 control, 40% LOP, 80% LOP (Limb occlusion pressure)). Los restantes estudios presentaron un grupo control y uno experimental (22,25–29). Las plastias empleadas fueron: isquiotibial (58,62%), rotuliano (38,1%) y cuadrícipital (3,07%).

En cuanto a la oclusión, 5 estudios usaron el 80% del LOP (23–26,29), uno empleó el 60%, (22), y dos reportaron la presión en miligramos de mercurio (mmHg) sin especificar el porcentaje (27,28). Respecto a la intensidad aplicada en los programas de intervención, algunos estudios aplicaron el 70% del 1RM en los grupos control (22,23,25,29), y el 30% en los grupos BFR (22,25,29), mientras que otros no especificaron el RM (24,26,27).

Los protocolos variaron: algunos incluyeron ejercicios clásicos de rehabilitación con BFR (22,26–28),

otros utilizaron el esquema 30-15-15-15 con ejercicios específicos (25,29), y algunos combinaron ambos (24). Curran et al. (23) utilizaron un protocolo de 4 series de 10 repeticiones en los grupos BFR y sin BFR.

Respecto al momento o fase de intervención, dos estudios aplicaron BFR antes y después de la cirugía (22,26); el resto lo hizo solo en el postoperatorio. El tiempo de inicio de la intervención varió entre 2 días (28) y 10 semanas (23), siendo común las 2 semanas (22,25,27).

La fuerza fue evaluada mediante dinamómetros Biodex (22–25,27) o convencionales (26,29). En cuanto a la hipertrofia, la medición se realizó mediante resonancia magnética (22,27,28) o ecografía (23–25). La funcionalidad se midió con escalas IKDC y Lysholm. 2 estudios usaron ambas (25,29), el resto solo IKDC (23,24,26).

5.3 Riesgo de sesgo y evaluación de calidad

Todos los estudios presentaron bajo riesgo en la aleatorización y el reporte selectivo en la escala Cochrane (**figuras 2A y 2B**). Ninguno pudo cegar a los terapeutas. El 50% de los ensayos clínicos revisados tuvo alto riesgo en ocultación de la asignación (24,26–28) y en el cegamiento de la evaluación (23,24,26,29). El estudio con más riesgo de sesgo fue el de Li et al. (24); el más sólido metodológicamente fue Erickson et al. (22). Tres estudios (24,27,28) mostraron riesgo incierto.

En la escala PEDro (**tabla 4**), el estudio de Erickson et al. (22) obtuvo la mejor puntuación; mientras que los realizados por Li et al. (24) y Okorooha et al. (26), obtuvieron la más baja. La media general fue 6 puntos (moderada).

5.4 Síntesis de resultados

Se realizaron tres forest plot (**Figuras 3-5**) para analizar las principales variables clínicas en distintos momentos temporales. Sus resultados expresados en forma de forest plot y los comentarios relacionados se pueden observar en el **anexo 4**.

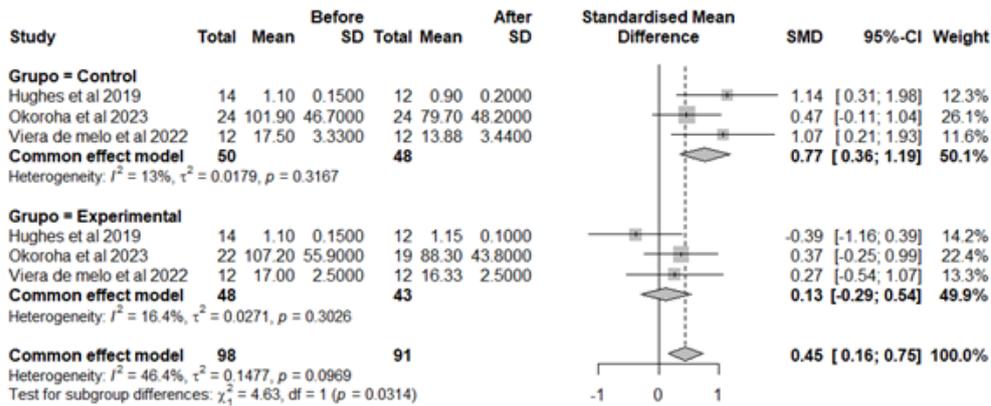


Figura 3. Fuerza Extensora 8-10 semanas

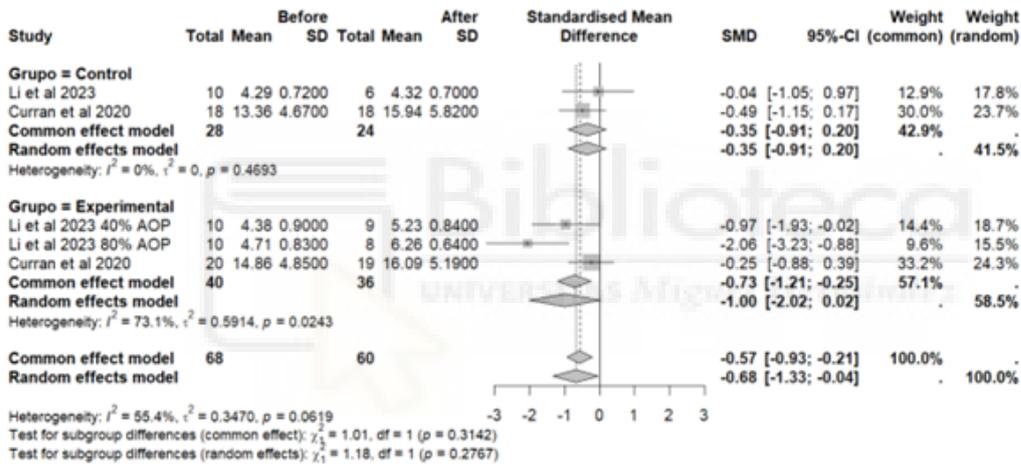


Figura 4. Hipertrofia 8 semanas

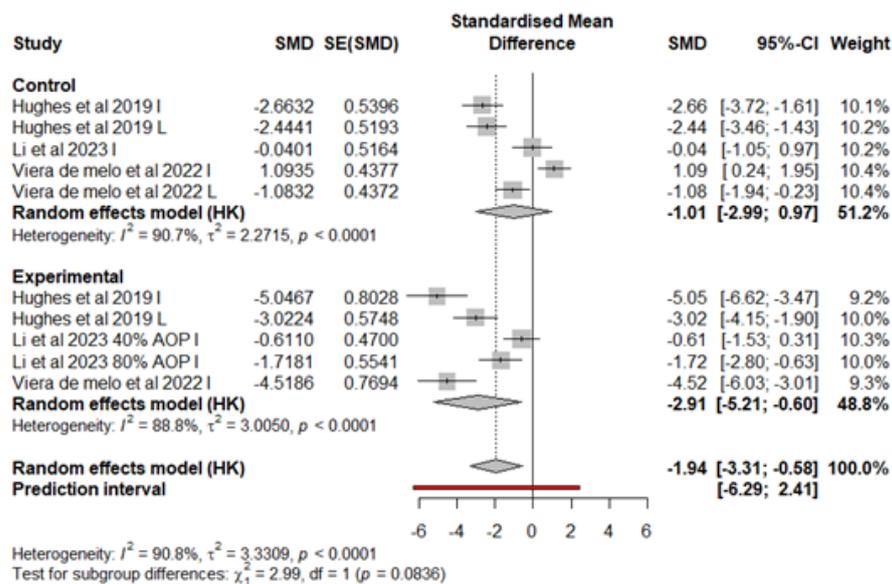


Figura 5. Funcionalidad 8 semanas

I: Escala IKDC L: Escala Lysholm AOP: Arterial Occlusion Pressure



6. DISCUSIÓN

6.1. Fuerza

El metaanálisis mostró un descenso significativo de la fuerza extensora en general (95%CI: [0.16, 0.75]). Esto se debe a que las mediciones de fuerza se realizaron antes de la intervención quirúrgica y tras finalizar el protocolo de rehabilitación, por lo que es esperable una atrofia muscular generalizada en ese periodo (6,7).

Se observaron diferencias significativas entre los grupos ($p= 0.031$): el grupo experimental (BFR) presentó una menor atrofia, e incluso en uno de los estudios se observó un aumento de la fuerza, como es el caso de Hughes et al. (25). A diferencia de los otros dos estudios incluidos en el metaanálisis (26,29), que utilizaron el 1RM preoperatorio o una carga baja compatible con el esquema clásico de 30-15-15-15, Hughes et al. (25) determinaron el 10RM para estimar el 30% del 1RM. Usar el 10RM como referencia puede ser más realista, ya que desde la medición del 1RM preoperatorio hasta el inicio de la intervención pueden haber ocurrido cambios relevantes como: aumento del dolor, reducción de la movilidad y debilitamiento de la plastia. En este contexto, el uso del 10RM permitiría un acercamiento más preciso al 30% de 1RM que habitualmente se emplea en protocolos con BFR (12,13), lo que podría contribuir a mejores resultados.

En el análisis cualitativo, varios estudios reportaron una mayor ganancia de fuerza con respecto al grupo control (24,26,27), aunque no aplicaron cargas elevadas en la intervención, sugiriendo que el entrenamiento con BFR a bajas cargas puede ser más efectivo que el entrenamiento tradicional sin BFR en esas mismas condiciones, no obstante, el protocolo no es el mismo por lo que conviene interpretar los resultados con cautela.

Por otro lado, los estudios en los que el grupo control trabajó al 70% 1RM (22,25) no encontraron diferencias significativas frente al grupo BFR que entrenó al 30% 1RM.

Esto podría indicar que el BFR puede igualar los efectos del entrenamiento tradicional de altas cargas incluso utilizando cargas más ligeras, lo que es de gran utilidad en las fases tempranas de la rehabilitación.

Sin embargo, estos resultados contrastan con otros estudios que estudian las cargas (11,30) ya que afirman que el entrenamiento con altas cargas es superior al entrenamiento con bajas cargas, justificando que trabajar en cargas cercanas al 1RM optimiza las adaptaciones neurales y mecánicas necesarias para la fuerza máxima. Siguiendo esta línea, se sugiere que en etapas más avanzadas de la rehabilitación sería más apropiado abandonar el uso de BFR y progresar hacia cargas altas tradicionales, de hecho, según Curran et al. (23), el entrenamiento combinado con BFR y altas cargas no ofrece beneficios adicionales frente al entrenamiento con altas cargas sin BFR.

El estudio de Erickson et al. (22) destacó por su calidad metodológica y su prolongado seguimiento de cuatro meses. A pesar de ello, no encontró diferencias significativas en ninguna variable de fuerza ni en otras medidas funcionales, lo que podría llevar a cuestionar la eficacia de la intervención con BFR. Ahora bien, este fue el único estudio que utilizó un LOP del 60%, en contraste con otros estudios que emplearon un LOP del 80% y sí observaron mejoras (24,26,29). En particular, el estudio de Li et al. (24) comparó diferentes niveles de oclusión (0%, 40% y 80%) y destacó que el grupo con el 80% de LOP obtuvo los mejores resultados.

Por otra parte, el diseño del estudio de Erickson et al. (22) incluyó una duración de cuatro meses, y las variables de fuerza se midieron únicamente en el periodo preoperatorio y al finalizar el estudio. Esta característica metodológica puede haber influido en los resultados, disminuyendo la capacidad para detectar mejoras tempranas. En relación con esto, el estudio de Okoroa et al. (26) no encontró diferencias significativas en la fuerza a partir de los tres meses, pero sí observó efectos positivos del BFR a las seis semanas. Estas dos características (el menor porcentaje de oclusión y la elección del momento de las mediciones) podrían haber condicionado los resultados de Erickson et al. (22).

Por ello el BFR podría mostrar una mayor eficacia si se aplica en fases más tempranas de la rehabilitación y niveles de oclusión superiores al 60%. Teniendo esto en cuenta, se requieren más estudios que evalúen estos factores para poder establecer un protocolo óptimo y consensuado.

Estos hallazgos de fuerza coinciden con metaanálisis de la misma temática, favoreciendo a la intervención con BFR, pero destacando la heterogeneidad y riesgo de sesgo entre los pocos estudios disponibles al momento (14,31,32).

6.2. Hipertrofia

En el análisis cuantitativo, ambos grupos presentaron hipertrofia a las 8 semanas en un periodo intermedio de la rehabilitación, aunque el aumento fue mayor en el grupo que recibió BFR, los resultados no alcanzaron significación estadística ($p=0.314$). Esto podría deberse a las diferencias en los protocolos de intervención, reflejadas en la heterogeneidad significativa del grupo experimental. Li et al. (24) utilizaron cargas ligeras (alrededor del 30% 1RM) en todos los grupos, mientras que Curran et al. (23) emplearon cargas altas (70% 1RM) en ambos grupos.

A partir de estos datos, podría pensarse que el BFR no ofrece beneficios adicionales cuando se combina con altas cargas, aunque sí podría resultar más efectivo que el entrenamiento convencional de baja intensidad. No obstante, el estudio de Li et al. (24) presenta limitaciones metodológicas importantes. Además, los estudios comparados no emplearon los mismos sistemas de ejercicios y solo fue posible contrastar dos estudios en este aspecto. Por ello, se requieren más investigaciones con diseños homogéneos y protocolos comparables para poder extraer conclusiones sólidas.

A nivel cualitativo, los estudios de Li et al. (24) y Ohta et al. (27) fueron los únicos que reportaron mejoras significativas en la hipertrofia a favor del grupo BFR respecto al grupo control. Una posible explicación es que en ambos casos se comparó BFR con entrenamientos de bajas cargas, aunque no se especifica claramente la carga utilizada. Esto favorece la hipótesis de que el BFR a baja intensidad puede ser más eficaz que el entrenamiento de baja intensidad sin BFR. Aun así, los resultados de Li et al. (24) deben interpretarse con precaución, ya que su intervención se realizó a partir de las 8 semanas postoperatorias y no justo tras el postoperatorio como Ohta et al. (27).

Por otro lado, otros estudios (22,25) emplearon protocolos comparativos con intensidades opuestas (BFR al 30% del 1RM y grupo control al 70%), sin encontrar diferencias significativas en cuanto a la hipertrofia. A pesar de ello, estos resultados refuerzan el valor del BFR como alternativa al entrenamiento tradicional con altas cargas, especialmente en contextos donde no es recomendable aplicar cargas elevadas.

Un caso particular es el estudio de Iversen et al. (28) que no encontró diferencias significativas entre BFR y el grupo control cuando ambos trabajaban con cargas bajas (~10% 1RM). Este estudio resulta

especialmente relevante al haber iniciado la intervención en una fase temprana del proceso de rehabilitación, momento en el que normalmente se restringen las cargas. Sin embargo, Abe et al. (33) señalan que una intensidad inferior al 10% del 1RM se encuentra por debajo del umbral mínimo necesario para inducir hipertrofia. Por tanto, cabe considerar que, de haberse incrementado la intensidad al rango más habitual del 20-30% del 1RM (13), los resultados podrían haber sido distintos.

Estos resultados junto con los hallazgos de otras revisiones (31,32), sugieren que el BFR aplicado a baja intensidad puede ser una estrategia útil para inducir hipertrofia muscular en el cuádriceps durante la rehabilitación postoperatoria, especialmente cuando el uso de cargas elevadas no es viable, pero se necesitan más estudios con protocolos homogéneos para extraer afirmaciones concluyentes.

6.3. Funcionalidad

Se utilizaron principalmente las escalas IKDC y Lysholm para evaluar la funcionalidad de la rodilla. La escala IKDC valora la función global de la articulación, llegando a 10 ítems. Por su parte, la escala Lysholm se enfoca específicamente en aspectos funcionales relacionados con la estabilidad ligamentaria, evaluando ocho ítems. Ambas escalas comparten un rango de puntuación de 0 a 100, siendo 100 el mejor estado funcional, lo que permite su comparación en el metaanálisis.

En el análisis cuantitativo, los resultados favorecieron al grupo experimental (BFR), aunque no se encontraron diferencias estadísticamente significativas respecto al grupo control ($p = 0.084$). No obstante, la mayoría de los cuestionarios empleados reflejaron mejoras positivas (IC 95%: [-3.31, -0.58]). Se observó una heterogeneidad alta y significativa en los resultados ($p = 0.084$), probablemente atribuible a la variabilidad en los protocolos de intervención.

Tanto Viera de Melo et al. (29), como Hughes et al. (25) aplicaron protocolos similares (altas cargas sin BFR frente a bajas cargas con BFR), obteniendo los mejores resultados en el grupo experimental. Ambos estudios compartieron un protocolo basado en prensa de piernas con el esquema 30-15-15-15 y LOP al 80%, lo que sugiere que este enfoque puede ser especialmente efectivo para mejorar la funcionalidad en pacientes operados de LCA.

Curiosamente, Viera de Melo et al. (29) fue el estudio con mayor peso en el grupo experimental y el

que reportó el mejor efecto, pero, en el grupo control se observó un descenso en el cuestionario IKDC a las 8 semanas. Una posible explicación sería la aplicación de altas cargas en la prensa de piernas y la silla flexora tras la fase hospitalaria, lo que pudo haber afectado negativamente a la recuperación. Esto refuerza la utilidad del BFR en etapas en las que la carga articular debe minimizarse.

En cuanto al análisis cualitativo, todos los estudios que evaluaron la funcionalidad de la rodilla (24,25,26,29) encontraron diferencias estadísticamente significativas a favor del grupo experimental, con la excepción de Curran et al. (23). Este contraste podría explicarse porque Curran et al. (23) aplicaron altas cargas en ambos grupos, mientras que en los demás estudios el grupo experimental trabajó con baja carga. Así, el menor estrés articular asociado al entrenamiento a baja intensidad con BFR podría haber favorecido mejores respuestas en los cuestionarios de funcionalidad, al reducir la sobrecarga sobre la rodilla durante el proceso de rehabilitación.

En resumen, el entrenamiento con BFR a bajas cargas mostró mejoras funcionales comparables al entrenamiento convencional. Aunque no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el análisis cuantitativo, el análisis cualitativo destacó beneficios a favor del BFR, coincidiendo con hallazgos de otras revisiones al respecto (31,32,34). La variabilidad en los protocolos sugiere la necesidad de estandarización para obtener resultados más consistentes.

7. LIMITACIONES

Este metaanálisis presenta algunas limitaciones importantes. En primer lugar, existe una importante heterogeneidad entre los estudios incluidos, tanto en los protocolos de entrenamiento como en la duración, el seguimiento y los parámetros del torniquete, lo que dificulta la interpretación de los resultados. Además, el número de estudios elegibles fue limitado debido a la reciente implementación del BFR en el ámbito clínico. Por último, la imposibilidad de obtener ciertos datos no reportados en los artículos, pese a haber intentado contactar con los autores, además de trabajar con los tamaños de efecto y su error estándar en casos como la funcionalidad, pudo haber reducido la potencia estadística del análisis.



8. CONCLUSIÓN

El entrenamiento con restricción del flujo sanguíneo (BFR) se presenta como una alternativa en la rehabilitación tras cirugía de LCA, especialmente en fases tempranas donde no se toleran cargas elevadas. Aunque los resultados no siempre muestran diferencias estadísticamente significativas, se observan tendencias positivas en fuerza y funcionalidad, similares al entrenamiento convencional. Los beneficios sobre la hipertrofia parecen ser más notables cuando el BFR se aplica con cargas bajas, mostrando resultados similares al entrenamiento tradicional con cargas elevadas.

El grado de oclusión (especialmente en torno al 80% del LOP) y el momento de aplicación (etapas tempranas postquirúrgicas) parecen ser factores clave que modulan la efectividad del BFR.

La alta heterogeneidad y el número limitado de estudios limitan la solidez de las conclusiones, por lo que se requieren más investigaciones con protocolos homogéneos. Aun así, el BFR demuestra ser una estrategia interesante en este contexto clínico.



Material Suplementario

La información complementaria puede descargarse en:

https://drive.google.com/drive/folders/1tBbnuc5PSTqtIVbP_qIGu3ZNV2cgPQIw.

Contribuciones de los autores

Organización e integración de datos: JVTM, JVSH, AVT; Análisis formal: JVSH, AVT; Investigación: AVT; Metodología: JVTM, JVSH; Administración del proyecto: JVTM, JVSH; Recursos: JVTM, AVT; Software: JVSH; Supervisión: JVTM, JVSH; Validación: JVTM, JVSH; Visualización: AVT; Redacción del borrador original: AVT; Revisión y edición: JVTM, JVSH.

Financiación

Esta investigación no recibió financiación externa.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera contribuir a un potencial conflicto de interés.

9. REFERENCIAS

1. Acevedo RJ, Rivera-Vega A, Miranda G, Micheo W. Anterior cruciate ligament injury: Identification of risk factors and prevention strategies. *Current Sports Medicine Reports*. 2014;13:186–91.
2. Boden BP, Dean CS, Feagin JA, Garrett WE. Mechanisms of anterior cruciate ligament injury. *Orthopedics*. 2000;23:573–8.
3. Boden BP, Sheehan FT, Torg JS, Hewett TE. Noncontact anterior cruciate ligament injuries: Mechanisms and risk factors. Vol. 18, *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*. Lippincott Williams and Wilkins; 2010. p. 520–7.
4. Larwa J, Stoy C, Chafetz RS, Boniello M, Franklin C. Stiff landings, core stability, and dynamic knee valgus: A systematic review on documented anterior cruciate ligament ruptures in male and female athletes. Vol. 18, *International Journal of Environmental Research and Public Health*. MDPI AG; 2021.
5. Requejo-Herrero P, Pineda-Galan C, Medina-Porqueres I. Anterior cruciate ligament ruptures in Spanish soccer first division: An epidemiological retrospective study. *Knee*. 2023 Mar;41:48–57.
6. Bryant AL, Kelly J, Hohmann E. Neuromuscular adaptations and correlates of knee functionality following ACL reconstruction. *Journal of Orthopaedic Research*. 2008 Jan;26:126–35.
7. Thomas AC, Wojtys EM, Brandon C, Palmieri-Smith RM. Muscle atrophy contributes to quadriceps weakness after anterior cruciate ligament reconstruction. *Journal of Science and Medicine in Sport*. 2016 Jan;19:7–11.
8. Garber CE, Blissmer B, Deschenes MR, Franklin BA, Lamonte MJ, Lee IM, et al. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: Guidance for prescribing exercise. *Medicine and Science in Sports*

and Exercise. 2011 Jul;43:1334–59.

9. Mitchell CJ, Churchward-Venne TA, West DWD, Burd NA, Breen L, Baker SK, et al. Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *Journal of Applied Physiology*. 2012 Jul;113:71–7.

10. Schoenfeld BJ, Grgic J, Ogborn D, Krieger JW. Strength and hypertrophy adaptations between low- vs. High-load resistance training: A systematic review and meta-analysis. Vol. 31, *Journal of Strength and Conditioning Research*. NSCA National Strength and Conditioning Association; 2017. p. 3508–23.

11. Lasevicius T, Ugrinowitsch C, Schoenfeld BJ, Roschel H, Tavares LD, de Souza EO, et al. Effects of different intensities of resistance training with equated volume load on muscle strength and hypertrophy. *European Journal of Sport Science*. 2018 Jul;18:772–80.

12. Wortman RJ, Brown SM, Savage-Elliott I, Finley ZJ, Mulcahey MK. Blood Flow Restriction Training for Athletes: A Systematic Review. *American Journal of Sports Medicine*. 2021 Jun;49:1938–44.

13. Watson R, Sullivan B, Stone A, Jacobs C, Malone T, Heebner N, et al. Blood Flow Restriction Therapy: An Evidence-Based Approach to Postoperative Rehabilitation. Vol. 10, *JBJS Reviews*. *Journal of Bone and Joint Surgery Inc.*; 2022.

14. But J, Ahmed Z. Blood Flow Restriction Training and Its Use in Rehabilitation After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of clinical medicine*. 2024 Oct;13.

15. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, Boutron I, Hoffmann TC, Mulrow CD, et al. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. Vol. 372, *The BMJ*. *BMJ Publishing Group*; 2021.

16. Page MJ, Shamseer L, Tricco AC. Registration of systematic reviews in PROSPERO: 30,000 records and counting. *Systematic Reviews*. 2018 Feb;7.
17. Paris AN, Ng C, Gatt T, Galdes N, Wehbi H, Marston D, et al. Return to Sport, Re-injury and Performance After the Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: Evaluating the Role of International Knee Documentation Committee (IKDC) and Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS) Scoring Systems. *Cureus*. 2024 Apr;16:e58574.
18. Briggs KK, Lysholm J, Tegner Y, Rodkey WG, Kocher MS, Steadman JR. The reliability, validity, and responsiveness of the lysholm score and tegner activity scale for anterior cruciate ligament injuries of the knee: 25 years later. *American Journal of Sports Medicine*. 2009;37:890–7.
19. Higgins JPT, Altman DG, Gøtzsche PC, Jüni P, Moher D, Oxman AD, et al. The Cochrane Collaboration’s tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ (Online)*. 2011 Oct;343.
20. De Morton NA. The PEDro scale is a valid measure of the methodological quality of clinical trials: a demographic study. *Australian Journal of Physiotherapy*. 2009;55:129–33.
21. Ariel de Lima D, Helito CP, de Lima LL, Clazzer R, Gonçalves RK, de Camargo OP. HOW TO PERFORM A META-ANALYSIS: A PRACTICAL STEP-BY-STEP GUIDE USING R SOFTWARE AND RSTUDIO. *Acta ortopedica brasileira*. 2022;30:e248775.
22. Erickson LN, Owen MK, Casadonte KR, Janatova T, Lucas K, Spencer K, et al. The Efficacy of Blood Flow Restriction Training to Improve Quadriceps Muscle Function after ACL Reconstruction. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 2024 Feb;
23. Curran MT, Bedi A, Mendias CL, Wojtys EM, Kujawa M v., Palmieri-Smith RM. Blood Flow Restriction Training Applied With High-Intensity Exercise Does Not Improve Quadriceps Muscle

Function After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Randomized Controlled Trial. *American Journal of Sports Medicine*. 2020 Mar;48:825–37.

24. Li X, Li J, Qing L, Wang H, Ma H, Huang P. Effect of quadriceps training at different levels of blood flow restriction on quadriceps strength and thickness in the mid-term postoperative period after anterior cruciate ligament reconstruction: a randomized controlled external pilot study. *BMC Musculoskeletal Disorders*. 2023 Dec;24.

25. Hughes L, Rosenblatt B, Haddad F, Gissane C, McCarthy D, Clarke T, et al. Comparing the Effectiveness of Blood Flow Restriction and Traditional Heavy Load Resistance Training in the Post-Surgery Rehabilitation of Anterior Cruciate Ligament Reconstruction Patients: A UK National Health Service Randomised Controlled Trial. *Sports Medicine*. 2019 Nov;49:1787–805.

26. Okoroha KR, Tramer JS, Khalil LS, Jildeh TR, Abbas MJ, Buckley PJ, et al. Effects of a Perioperative Blood Flow Restriction Therapy Program on Early Quadriceps Strength and Patient-Reported Outcomes After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *Orthopaedic journal of sports medicine*. 2023 Nov;11:23259671231209696.

27. Ohta H, Kurosawa H, Ikeda H, Iwase Y, Satou N, Nakamura S. Low-load resistance muscular training with moderate restriction of blood flow after anterior cruciate ligament reconstruction. *Acta Orthopaedica Scandinavica*. 2003 Feb;74:62–8.

28. Iversen E, Røstad V, Larmo A. Intermittent blood flow restriction does not reduce atrophy following anterior cruciate ligament reconstruction. *Journal of Sport and Health Science*. 2016 Mar;5:115–8.

29. Vieira de Melo RF, Komatsu WR, Freitas MS de, Vieira de Melo ME, Cohen M. Comparison of Quadriceps and Hamstring Muscle Strength after Exercises with and without Blood Flow Restriction following Anterior Cruciate Ligament Surgery: A Randomized Controlled Trial. *Journal of rehabilitation medicine*. 2022 Nov;54:jrm00337.

30. Lixandrão ME, Ugrinowitsch C, Berton R, Vechin FC, Conceição MS, Damas F, et al. Magnitude of Muscle Strength and Mass Adaptations Between High-Load Resistance Training Versus Low-Load Resistance Training Associated with Blood-Flow Restriction: A Systematic Review and Meta-Analysis. Vol. 48, Sports Medicine. Springer International Publishing; 2018. p. 361–78.
31. Gopinath V, Garcia JR, Reid IK, Knapik DM, Verma NN, Chahla J. Blood Flow Restriction Enhances Recovery After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *Arthroscopy - Journal of Arthroscopic and Related Surgery*. 2024 Apr;
32. Fraca-Fernández E, Ceballos-Laita L, Hernández-Lázaro H, Jiménez-Del-Barrio S, Mingo-Gómez MT, Medrano-de-la-Fuente R, et al. Effects of Blood Flow Restriction Training in Patients before and after Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Healthcare (Basel, Switzerland)*. 2024 Jun;12.
33. Abe T, Loenneke JP, Fahs CA, Rossow LM, Thiebaud RS, Bemben MG. Exercise intensity and muscle hypertrophy in blood flow-restricted limbs and non-restricted muscles: A brief review. *Clinical Physiology and Functional Imaging*. 2012 Jul;32:247–52.
34. Li X, Xiao F, Ren H, Peng Y, Feng F, Dong Q. The effects of blood flow restriction training on early muscle strength and mid-term knee function following anterior cruciate ligament reconstruction: a systematic review and meta-analysis. Vol. 20, *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*. BioMed Central Ltd; 2025.

10. ANEXOS

Anexo 1. Lista de verificación PRISMA 2020

Ítem	Sección	Descripción	Ubicación	Cumplido
TÍTULO				
1	Título	Identificación como revisión sistemática o metaanálisis	Portada	Sí
RESUMEN				
2	Resumen	Resumen estructurado conforme a PRISMA	p. 5 (Resumen)	Sí
INTRODUCCIÓN				
3	Justificación	Contexto científico y objetivo	p.7 (Introducción)	Sí
4	Objetivos	Pregunta clara con PICO	p. 9 (Objetivos)	Sí
MÉTODOS				
5	Criterios de elegibilidad	Criterios de inclusión/exclusión	p. 11 (4.3. Criterios de elección)	Sí
6	Fuentes de información	Bases de datos consultadas	p. 10 (4.2. Estrategia de búsqueda)	Sí
7	Estrategia de búsqueda	Estrategia reproducible	Anexo 2-3 y p 10	Sí
8	Proceso de selección	Selección de estudios y revisión por pares	p. 11 (4.4. Selección de estudios y recolección de datos)	Sí
9	Extracción de datos	Método de extracción	p. 11 (4.4. Selección de estudios y recolección de datos)	Sí
10	Items de datos	Variables extraídas	p. 12 (4.5. Síntesis y análisis de datos)	Sí
11	Evaluación del riesgo de sesgo	Herramientas empleadas	p. 11 (4.6 Riesgo de sesgo y evaluación de la calidad)	Sí
12	Medidas de efecto	Medidas y síntesis de datos	p. 11-12 (4.7. Síntesis y análisis de datos)	Sí
13	Métodos de síntesis			

	13a	Proceso de elegibilidad de estudios	p.10-11 (4.4. Selección de estudios y recolección de datos)	Sí
	13b	Método de preparación de síntesis	P.12 (4.7. Síntesis y análisis de datos)	Sí
	13c	Método para presentar los datos	P.11 (4.7. Síntesis y análisis de datos)	Sí
	13d	Método de síntesis de resultados (descripción metanálisis)	P.11-12 (4.7. Síntesis y análisis de datos)	Si
	13f	Método para explicar heterogeneidad	P.11-12 (4.7. Síntesis y análisis de datos)	Si
	13f	Análisis de sensibilidad	P.11-12 (4.7. Síntesis y análisis de datos)	Si
14	Evaluación del sesgo	Descripción de método para evaluar el riesgo de sesgo	P.11 (4.6. Riesgo de sesgo y evaluación de la calidad)	Si
15	Evaluación de la certeza de la evidencia	Métodos para evaluar la certeza	P.11 (4.6. Riesgo de sesgo y evaluación de la calidad)	Si
RESULTADOS				
16	Diagrama de flujo	Proceso de selección visual	p. 13 (5.1. Selección de estudios + Fig. 2)	Sí
17	Características de los estudios	Tabla y texto descriptivo	p. 13 (5.2. Características de los estudios) + Figuras 3-4	Sí
18	Riesgo de sesgo en estudios	Por estudio individual	p. 14 (5.3 Riesgo de sesgo y evaluación de la calidad)+ Fig. 5-6	Sí
19	Resultados de estudios individuales	Datos y síntesis narrativa	p. 13-16 (5. Resultados)	Sí
20	Resultados de la síntesis	Forest plot y estadísticas	p. 15 (5.4. Síntesis de resultados) + Anexo 4	Sí
21	Sesgos en la publicación	Evaluaciones del sesgo debido a resultados faltantes	p. 14 (5.4. Síntesis de resultados) + Anexo 4	Si
22	Certeza de la evidencia	GRADE u otro sistema	No indicado	No

DISCUSIÓN				
	23a	Interpretación general de hallazgos	p. 17–21 (6. Discusión)	Sí
	23b	Limitaciones de la evidencia	p. 22 (7. Limitaciones)	Si
	23c	Limitaciones de los procesos de revisión y externas	p. 22 (7. Limitaciones)	Sí
	23d	Implicaciones y futuras líneas	p. 23 (8. Conclusión)	Sí
OTRA INFORMACIÓN				
24	Protocolo y registro			
	24a	Registro en base de datos o comité	p. 10 (4.1. Protocolo de registro)	Sí
25	24b	Declaración explícita	P.24	Si
	24c	Enmiendas a la información proporcionada	P.24	SI
25	Financiación	Fuentes de apoyo financiero	P.24	SI
26	Roles de autor y conflictos de intereses	Taxonomía CRediT	P.24	Sí
27	Disponibilidad de datos, códigos y otros materiales	Disponibilidad de datos al público	P.24	Si

Listado de Verificación PRISMA PARA RESÚMENES ESTRUCTURADOS

Ítem	Sección	Descripción	Ubicación	Cumplido
TÍTULO				
1	Título	Identificación como revisión sistemática o metaanálisis	Portada	Sí
ANTECEDENTES				
2	Objetivos	Declaración de los principales objetivos	p. 5 (Objetivo)	Sí
MÉTODOS				
3	Criterios de elegibilidad	Criterios de inclusión y exclusión	p. 5 (Métodos)	Sí

4	Fuentes de información	Bases de datos	p. 5 (Métodos)	Sí
5	Riesgo de sesgo de los estudios individuales	Métodos para evaluar el sesgo	p. 5 (Métodos)	Sí
6	Síntesis de los resultados	Métodos para presentar y sintetizar los resultados	p. 5 (Métodos)	Sí
RESULTADOS				
7	Estudios incluidos	Número total de estudios	P. 5 (Resultados)	Sí
8	Síntesis de los resultados	Resultados de los desenlaces de los estudios	P. 5 (Resultados)	Sí
DISCUSIÓN				
9	Limitaciones de la evidencia	Resumen de las limitaciones de la evidencia	P.5 (Discusión)	Si
10	Interpretación	Interpretación general de los resultados	P.5 (Discusión)	si
OTROS				
11	Financiación	Fuente de financiación	P.5 (Financiación)	No
12	Registro	Nombre y número de registro	P.5 (Registro)	si

ANEXO 2. Tabla-resumen del proceso de búsqueda inicial. Registros obtenidos, con y sin filtros adicionales.

PALABRAS CLAVE			
1	Blood Flow Restriction Therapy	6	Anterior cruciate ligament injury
2	BFR	7	Knee ligament injury
3	Occlusion training	8	
4	Vascular occlusion	9	
5	ACL	10	
LÍMITES			
1	Artículos en inglés o español	4	Sólo ensayos clínicos aleatorizados
2	Artículos solo en humanos vivos		
3	Sólo pacientes con reconstrucción de LCA		

BASE DE DATOS	REFERENCIA	ECUACIÓN DE BÚSQUEDA	REGISTROS OBTENIDOS	FILTROS	COMENTARIOS*
PUBMED	#1	("Blood Flow Restriction Therapy"[Mesh] OR "BFR"[Title/Abstract] OR "Blood flow restriction therapy"[Title/Abstract] OR "Vascular occlusion"[Title/Abstract])	7535	Ensayos clínicos aleatorizados	385
				Revisiones sistemáticas	163
				Meta análisis	88
	#2	("Blood Flow Restriction Therapy"[Mesh] OR "BFR"[Title/Abstract] OR "Blood flow restriction therapy"[Title/Abstract] OR "Vascular occlusion"[Title/Abstract]) AND ("Acl"[Title/Abstract] OR "anterior cruciate ligament"[Title/Abstract])	51	Ensayos clínicos aleatorizados	9
				Revisiones sistemáticas	13
				Metanálisis	2
	#3	((("Blood Flow Restriction Therapy"[Mesh] OR "BFR"[Title/Abstract] OR "Blood flow restriction"[Title/Abstract] OR "Vascular occlusion"[Title/Abstract] OR "Occlusion training"[Title/Abstract]) AND ("ACL"[Title/Abstract] OR "anterior cruciate ligament"[Title/Abstract] OR "ACL injury"[Title/Abstract] OR "knee ligament injury"[Title/Abstract]))	68	Ensayos clínicos aleatorizados	12
				Revisiones sistemáticas	17
				Metanálisis	2

EMBASE	#1	blood flow restriction therapy'/exp OR 'bfr':ti,ab OR 'blood flow restriction therapy':ti,ab OR 'vascular occlusion':ti,ab	10018	Ensayos clínicos aleatorizados	578
				Revisiones sistemáticas	215
				Metanálisis	170
	#2	('blood flow restriction therapy'/exp OR 'BFR':ti,ab OR 'blood flow restriction therapy':ti,ab OR 'vascular occlusion':ti,ab) AND ('ACL':ti,ab OR 'anterior cruciate ligament':ti,ab)	85	Ensayos clínicos aleatorizados	23
				Revisiones sistemáticas	16
				Metanálisis	11
	#3	('blood flow restriction therapy'/exp OR 'blood flow restriction therapy':ti,ab OR 'bfr':ti,ab OR 'vascular occlusion':ti,ab OR 'occlusion training':ti,ab) AND ('acl':ti,ab OR 'anterior cruciate ligament':ti,ab OR 'acl injury':ti,ab OR 'knee ligament injury':ti,ab)	86	Ensayos clínicos aleatorizados	23
				Revisiones sistemáticas	16
				Metanálisis	11



Anexo 3. Estrategia PICO

	Search strategy for PUBMED
PATIENT – P #1	("ACL"[Title/Abstract] OR "anterior cruciate ligament"[Title/Abstract] OR "ACL injury"[Title/Abstract] OR "knee ligament injury"[Title/Abstract]) 2,614 results
INTERVENTION – I #2	("Blood Flow Restriction Therapy"[Mesh] OR "BFR"[Title/Abstract] OR "Blood flow restriction"[Title/Abstract] OR "Vascular occlusion"[Title/Abstract] OR "Occlusion training"[Title/Abstract]) 640 results
COMPARATION- C	Patients treated with BFR after ACL surgery vs patients treated without BFR after ACL surgery
OUTCOMES – O #3	Strength, knee functionality, or hypertrophy
LIMITATIONS #4	Only Randomized controlled trials (RCTs), systematic reviews (SRs), and meta-analyses Exclusion of animal studies Exclusion of studies with healthy subjects
	#1 + #2 + #4 = 68 resultados

	Search strategy for EMBASE
PATIENT – P #1	('acl':ti,ab OR 'anterior cruciate ligament':ti,ab OR 'acl injury':ti,ab OR 'knee ligament injury':ti,ab) 2,921 results
INTERVENTION – I #2	('blood flow restriction therapy'/exp OR 'blood flow restriction therapy':ti,ab OR 'bfr':ti,ab OR 'vascular occlusion':ti,ab OR 'occlusion training':ti,ab) 692 results
COMPARATION- C	Patients treated with BFR after ACL surgery vs patients treated without BFR after ACL surgery
OUTCOMES – O #3	Strength, knee functionality, or hypertrophy
LIMITATIONS #4	Only Randomized controlled trials (RCTs), systematic reviews (SRs), and meta-analyses Exclusion of animal studies Exclusion of studies with healthy subjects
	#1 + #2 + #4 = 76 resultados

ANEXO 4. Forest plot y su interpretación

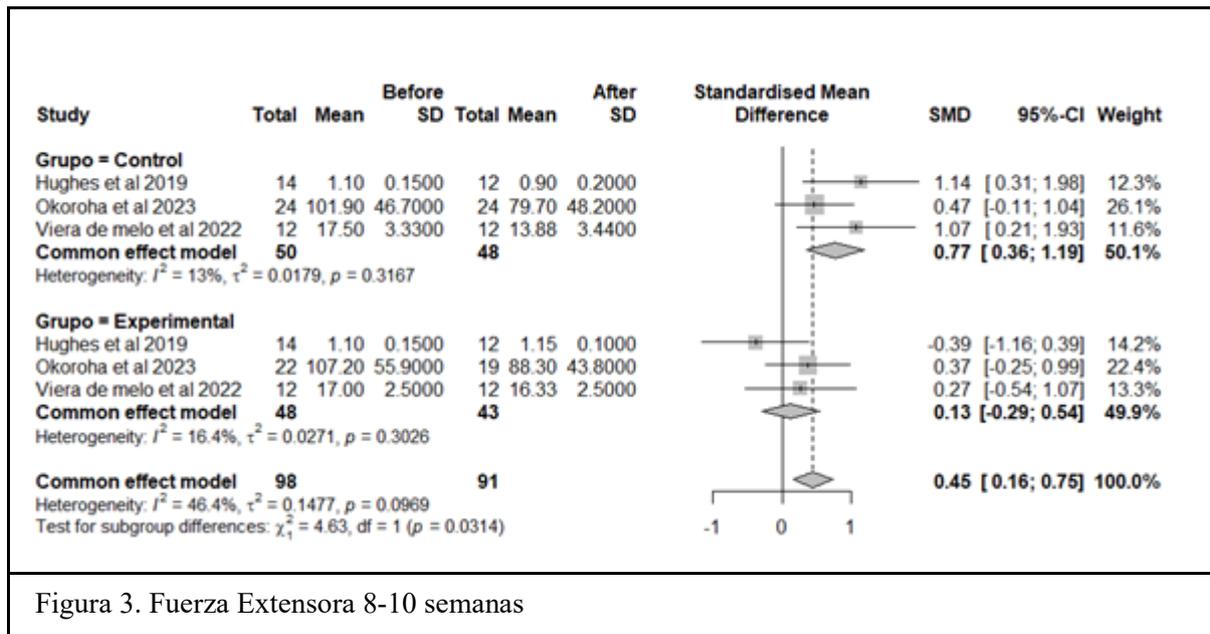


Figura 3. Fuerza Extensora 8-10 semanas

En relación con la fuerza, a las 8-9 semanas, el grupo control mostró una heterogeneidad baja y no significativa ($I^2 = 13\%$; $p = 0.31$), con un tamaño del efecto de 0.77 (IC 95%: [0.36, 1.19]), lo que indica un descenso significativo de la fuerza en ese intervalo de tiempo.

Por su parte, el grupo experimental presentó una heterogeneidad baja y no significativa ($I^2 = 16.4\%$; $p = 0.303$), y aunque el tamaño del efecto fue menor (SMD = 0.13), el intervalo de confianza correspondiente ([-0.29, 0.54]) incluyó el valor cero, por lo que no fue estadísticamente significativo.

La heterogeneidad global fue moderada y no significativa ($I^2 = 46.4\%$; $p = 0.01$). Entre ambos grupos hubo diferencias significativas ($p = 0.031$) y el tamaño del efecto global sería de 0.45, estadísticamente significativo (95%CI: [0.16, 0.75]), por lo que hubo un descenso en la fuerza global.

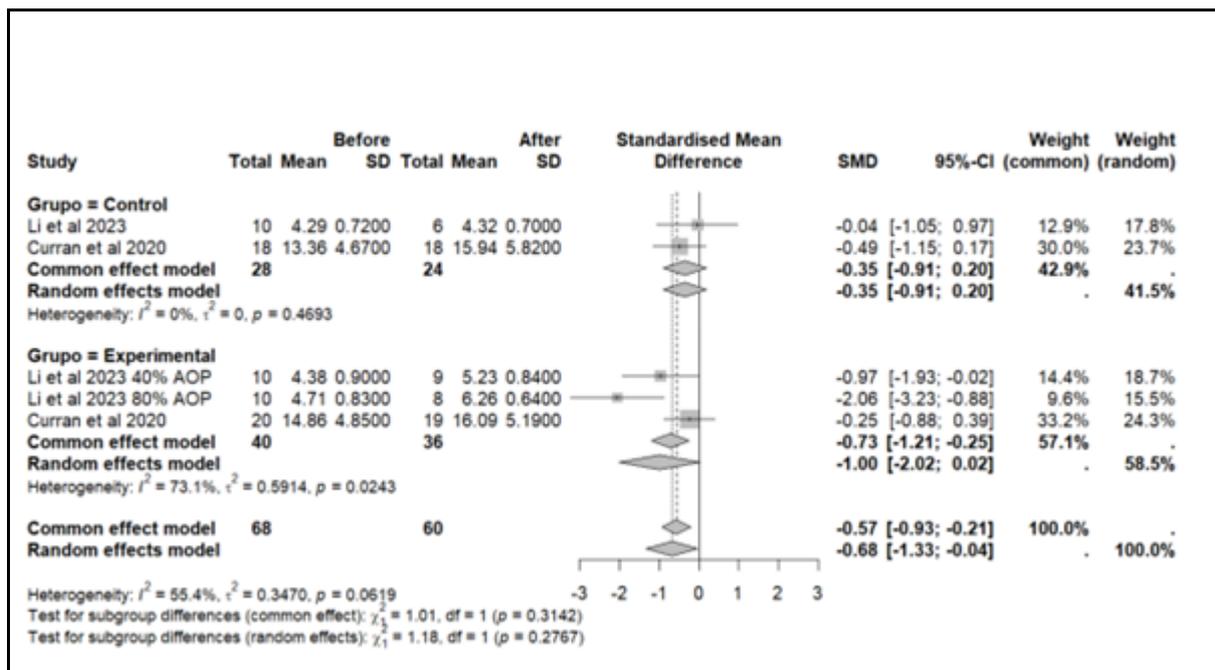


Figura 4. Hipertrofia 8 semanas

El grupo control tiene una heterogeneidad baja, del 0%, no significativa ($p = 0.47$) que indica que los estudios son homogéneos. El tamaño del efecto estimado (SMD) sería de -0.35, por lo que el grupo control tras la diferencia pre - post indica que tuvo un efecto positivo, no significativo al incluir el 0 en su intervalo de confianza

Respecto al grupo experimental, observamos que existe una heterogeneidad alta y significativa $I^2 = 73.1\%$ y $p = 0.024$, por lo que hay que recurrir a un modelo de efectos aleatorios. Por tanto, el SMD es de -1, siendo no significativo al incluir el 0 en el intervalo de confianza.

Globalmente, estaríamos hablando de un modelo de efectos fijos ($I^2 = 55.4\%$; $p = 0.061$) en el que no se encuentran diferencias significativas entre el grupo control y el grupo experimental ($p = 0.314$). El tamaño del efecto global sería de -0.57, estadísticamente significativo (95%CI: [-0.93, -0.21]).

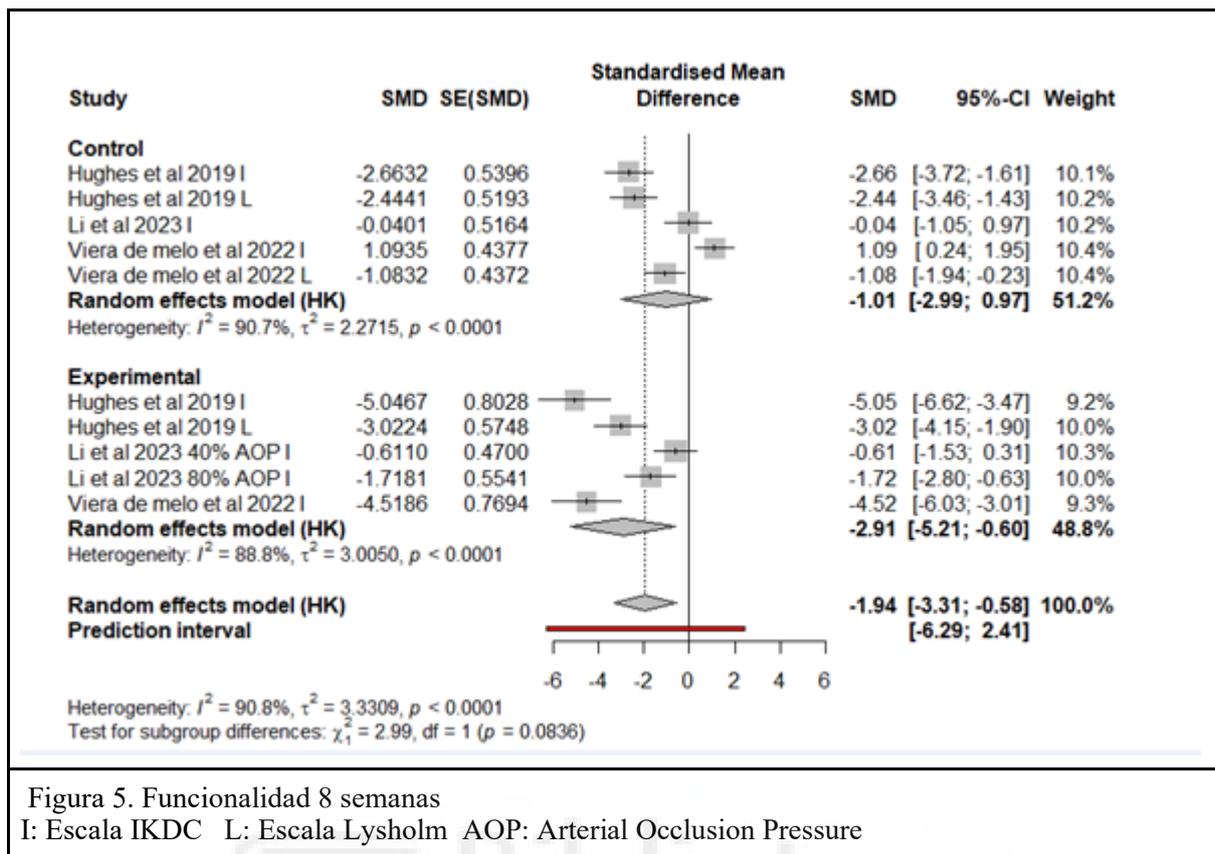


Figura 5. Funcionalidad 8 semanas

I: Escala IKDC L: Escala Lysholm AOP: Arterial Occlusion Pressure

Finalmente, en la variable de funcionalidad evaluada a las 8 semanas, el grupo control mostró una heterogeneidad alta y significativa ($I^2 = 90.7\%$; $p < 0.001$) con un tamaño del efecto negativo (SMD = -1.01), lo que sugiere un aumento no significativo.

El grupo experimental también presentó una heterogeneidad alta ($I^2 = 90.7\%$; $p < 0.0001$), pero con un tamaño del efecto considerablemente mayor (SMD = -2.91 ; IC 95%: $[-5.21, -0.60]$), lo que indica una mejora significativa en comparación con el grupo control.

El análisis global evidenció una heterogeneidad elevada ($I^2 = 90.8\%$; $p < 0.0001$), sin diferencias estadísticamente significativas entre grupos ($p = 0.084$). No obstante, el tamaño del efecto global fue de -1.94 , lo cual representa un aumento significativo de la funcionalidad a las 8 semanas (IC 95%: $[-3.31, -0.58]$).

11. FIGURAS Y TABLAS

Tabla 1. Concordancia entre revisores para la inclusión de estudios.

	% Concordancia	Kappa
RCTs búsqueda– title/abstract	95.65%	0.907
RCTs búsqueda– full text	100%	1
RS búsqueda - title/abstract	100%	1
RS búsqueda full text	100%	1



Tablas 2-3. Características de estudios

AUTOR	Participantes	Tipo de plastia	Oclusión	Intervención	Duración de la intervención	Edad	Sexo
Curran et al (2020) (23)	34 pacientes Control 8 concéntrico 8 Excéntrico Experimental (BFR) 9 Concéntrico 9 Excéntrico	25 hueso-rotuliano tendón hueso (BPTB) 6 semitendinoso-grácil (STG) 3 tendón cuadrícipital (QT) Concéntrico 7 (BPTB) y 1 STG Excéntrico 5 (BPTB) Y 3 (STG) Concéntrico con BFR 6 (BPTB), 1 (STG) y 2 (QT) Excéntrico con BFR 7 (BPTB) y 2 (STG)	80% oclusionion Easy-fit Tourniquet Cuff (Delfi Medical Interventions) Presión 136-167 en mmHg	Prensa de piernas a una sola pierna, a una intensidad del 70% del 1RM del paciente durante la acción concéntrica o excéntrica, durante 4 series de 10 repeticiones.	8 semanas, 2 veces por semana	Control Concéntrico 16.1 +/- 2.6 Excéntrico 18.8+/- 3.9 Experimental Concéntrico 15.3+-0.9 Excéntrico 16+-1.7	19 mujeres 15 hombres Control 5 hombres 11 mujeres Experimental 10 hombres 5 mujeres
Erickson et al (2025) (22)	48 pacientes 23 (BFR) experimenta 25 (SHAM) Control	Control Rotuliano 23 Isquiotibial 2 Experimental Rotuliano 22 Isquiotibial 1	BFR usó el sistema de torniquete personalizado delfi con Easy-fit tourniquet cuffs al 60% de oclusión SHAM usó KAATSU Nano con KAATSU Air bands con una presión de 20mmHg	Ejercicios pre y post (fase tardía) cirugía: extensión de rodilla sentado, prensa de piernas sentado, subidas y bajadas de caja y sentadillas en la pared con pelota. Ejercicios post cirugía(fase inicial): ejercicios sin peso: series de contracciones de cuádriceps, cuádriceps de arco corto, cuádriceps de arco largo, extensiones finales de rodilla en decúbito prono y elevaciones de pierna recta. BFR entrenó al 20-30% 1RM y SHAM 60-70% 1RM.	Se realizará una preintervención 1 mes antes de la cirugía y 4 meses de intervención tras la cirugía. 3 veces por semana.	Control 21.5 +/- 5.3 Experimental 21.1 +/- 6.3	28 hombres 20 mujeres
Hughes et al (2019) (25)	28 pacientes 14 experimental (BFR) 14 control (HL-RT (High load resistance training))	Todos los pacientes usaron plastia de isquiotibial	Se usó un Torniquete automático personalizado (Delfi Medical) al 80% LOP	(BFR) Prensa unilateral 2 veces x semana. 4 sets (30,15,15,15 repeticiones con 30s de descanso) al 30% de 1RM. (HL-RT) Prensa unilateral 2 veces por semana. 3 sets x 10 repeticiones al 70% del 1RM	8 semanas de intervención, 2 días a la semana	Control 29 +/- 7 Experimental 29+-7	Control 10 hombres y 2 mujeres Experimental 7 hombres 5 mujeres
Iversen et al (2016) (28)	24 pacientes 12 experimental 12 control	Todos los pacientes usaron plastia de isquiotibial	Se usó un torniquete neumático de oclusión de 14 cm de ancho Delphi de 130mmHg a 180mmHg	Ejercicios enfocados en cuádriceps consistiendo en: Isométricos, luego progresión a extensiones de pierna y elevaciones de pierna recta. El	16 Días de intervención, 2 días a la semana.	Control 29.8+-9.3 Experimental 24.9+-7.4	Control 7 hombres 5 mujeres Experimental 7 hombres 5 mujeres

				estudio sugiere IRM <= 10%			
Li et al (2023) (24)	23 pacientes Control 6 40% AOP 9 80% AOP 8	Autólogo (No se menciona de qué parte)	Airbands al 40% y al 80% de LOP	Semana 1-2: Ciclismo y entrenamiento isométrico con banda elástica, agregando sentadilla contra la pared con pelota de yoga. Semana 3-4: Sentadilla contra la pared y zancadas sin peso, luego progresando a subir y bajar escaleras. Semana 5-6: Extensión de rodilla con banda elástica y sentadillas con resistencia. Semana 7-8: Sentadilla búlgara y caminata lateral con resistencia. El número de sets fueron 4 (30-15-15-15) con 30 segundos de descanso. No especifica la carga exacta pero el estudio menciona una carga baja adaptada al paciente.	8 semanas con 2 sesiones por semana	Control 28.33+-5.19 BFR 40% 29.67+-3.97 BFR 80% 30.5+-5.26	No se menciona el número
Ohta et al (2003) (27)	44 pacientes 22 control y 22 experimental	Semitendinoso	Torniquete de aire con presión de 180 mmhg	Semanas 1-8: Elevación de pierna y abducción de cadera. Semanas 1-12: Aductores con balón y contracción de cuádriceps. Semanas 5-16: Media sentadilla y subida de escalón (progresión de carga hasta 14 kg). Semanas 9-16: Flexión de rodilla con banda elástica y caminata en media sentadilla. No se especifica la carga, pero se menciona carga baja.	16 semanas, 6 veces a la semana. (a partir de la 2ª semana se implementó BFR)	Control 30+-9.7 Experimental 28+-9.7	Control 12 hombres 10 mujeres Experimental 13 hombres 9 mujeres
Okoroha et al (2023) (26)	46 pacientes Control 24 Experimental 22	Control 17 rotuliano (BTB), 6 isquiotibial (HS) y 1 tendón cuadricipital (QT) Experimental 13 rotuliano (BTB), 7 isquiotibial (HS) y 2 tendón cuadricipital (QT)	Torniquete neumático single-chamber (Smart Tool Plus) al 80% de LOP	Preoperatorio: Ejercicios de fortalecimiento del cuádriceps en casa 5 veces/semana. Postoperatorio: series de cuádriceps, abducción de cadera en decúbito lateral, elevaciones de gemelos, elevaciones de	2 semanas de pre-rehabilitación y 12 semanas de rehabilitación post-cirugía. 2-3 veces por semana.	Control 27.5+-12 Experimental 25.4+-10.6	Control 16 hombres 8 mujeres Experimental 12 hombres 10 mujeres

				<p>pierna recta, series de cuádriceps de arco largo de 90° a 45° de flexión de rodilla y sentadillas de un cuarto. Una vez completados: Sentadillas, zancadas laterales/frontales, step-up, series de cuádriceps con rango completo. 4 sets (30-15-15) de 30s descanso en todos los ejercicios, a cargas bajas.</p>			
Viera de Melo et al (2022) (29)	28 pacientes 14 control 14 experimental	Plastia de isquiotibial	Usaron Cuff Scientific Leg® – WCS, Curitiba, Paraná, Brazil al 80% de LOP	Ejercicios: prensa de piernas y silla flexora (flexoextensión de rodilla). El grupo (BFR) entrenó al 30% de su 1RM, a 4 series (30,15,15,15), el grupo control trabajó con el 70% de 1RM en 3 series (10-10-10). Ambos grupos descansaron 30 segundos entre series.	La intervención duró 12 semanas y las sesiones fueron de 2 veces por semana	Control 39+-10.8 Experimental 41.1+-9.8	Control 9 hombres 3 mujeres Experimental 8 hombres 4 mujeres

AUTOR	Principales variables	Resultados	Tiempo desde la cirugía hasta la intervención
Curran et al (2020) (23)	-Torque de fuerza isométrica e isocinética. (Biodex System 3 dynamometer) -Activación muscular del cuádriceps -Volumen del recto anterior (Ecografía) -IKDC	No hubo ninguna diferencia significativa de ninguna variable para ninguno de los grupos.	10 semanas
Erickson et al (2025) (22)	-Torque de fuerza isométrica e isocinética.(Biodex Multi-Joint System 4 Isokinetic Dynamometer) -Morfología del cuádriceps (CSA) 3T MAGNETOM Prisma scanner (Resonancia magnética) -Fisiología del cuádriceps (Tipo de fibra muscular, CSA de la fibra, abundancia de células satélites, contenido en colágeno, células progenitoras fibrogénicas/adipogénicas) -Rom de la extensión y flexión de rodilla	No hubo ninguna diferencia significativa de ninguna variable para ninguno de los grupos.	1 mes de intervención antes de la cirugía. 2 semanas
Hughes et al (2019) (25)	-Fuerza isotónica máxima (10RM) (Biodex System 4 Isokinetic Dynamometer) -Morfología muscular del vasto lateral (Ecografía) -Opinión funcional del paciente (IKDC y Lysholm) -Rendimiento en el test Y-	La fuerza máxima de 10 repeticiones (10RM) aumentó significativamente en la pierna lesionada con BFR-RT y HL-RT, sin diferencias entre los grupos. En la pierna no lesionada, se observaron aumentos	2 semanas

	<p>balance</p> <p>-Dolor articular de la rodilla, efusión y ROM de la misma.</p> <p>-Laxitud de la articulación de la rodilla.</p> <p>-Fuerza máxima de extensión de rodilla isocinética en 60°/s, 150°/s y 300°/s (Biodex System 4 Isokinetic Dynamometer)</p>	<p>significativos en el torque máximo de extensión y flexión de rodilla a todas las velocidades, sin diferencias entre grupos.</p> <p>BFR-RT mostró una mayor reducción en la pérdida de torque extensor a 150°/s y 300°/s, y menor pérdida de torque flexor a todas las velocidades.</p> <p>Ambos métodos lograron aumentos similares en el grosor muscular y el ángulo de penetración, sin diferencias significativas.</p> <p>BFR-RT mostró mejoras significativamente mayores en las PROs, en el rendimiento del equilibrio (Y-balance), en el rango de movimiento (ROM), y en la reducción del dolor y la inflamación de la rodilla, en comparación con HL-RT.</p> <p>El presente estudio demuestra que la intervención con BFR puede mejorar la hipertrofia y la fuerza del músculo esquelético de forma similar a la intervención con HL, con una mayor reducción del dolor y el derrame articular de la rodilla, lo que se traduce en una mayor mejora general de la función física. Por lo tanto, la intervención con BFR podría ser más adecuada en la fase de carga progresiva de las extremidades durante la rehabilitación tras la cirugía en pacientes con RLCA (Reconstrucción de Ligamento Cruzado Anterior).</p>	
Iversen et al (2016) (28)	<p>Morfología anatómica muscular (ACSA) (Resonancia magnética)</p>	<p>Ambos grupos sufrieron una reducción del ACSA del cuádriceps, pero no hubo diferencia significativa entre ambos grupos respectivamente de la atrofia sufrida en los cuádriceps</p>	2 días
Li et al (2023) (24)	<p>-Fuerza máxima isocinética en 60°/s y 180°/s. (Biodex 3.0 dynamometer)</p> <p>-Suma del grosor del recto anterior y vasto intermedio.(Ecografía)</p> <p>-Test Y-balance</p> <p>-IKDC</p>	<p>La compresión al 80% de AOP mostró un aumento de fuerza y grosor del cuádriceps en comparación al grupo control. En comparación al grupo control, las variables del 40% y 80% de AOP mejoraron. Tras las 8 semanas de intervención, los resultados fueron mejores para el grupo al 80% de AOP que para el 40% de AOP</p>	8 semanas aproximadamente
Ohta et al (2003) (27)	<p>-Torques extensión y flexión de rodilla. (isokinetic myodynamometer, Biodex System 3)</p> <p>-Morfología de los músculos extensores de rodilla. (Resonancia magnética)</p>	<p>Las evaluaciones del torque de los músculos extensores y flexores de la rodilla antes de la cirugía y 16 semanas después mostraron un aumento significativo de la fuerza muscular en el grupo BFR en comparación con el grupo control</p> <p>La sección transversal de los músculos extensores de la rodilla mostró una mejora estadísticamente significativa en el grupo BFR frente al grupo</p>	2 semanas

		<p>control.</p> <p>Después de 16 semanas, los diámetros cortos de las fibras tipo 1 y tipo 2 del músculo vasto lateral tendieron a ser mayores en el grupo BFR que en el grupo control, aunque las diferencias no fueron significativas.</p>	
Okoroha et al (2023) (26)	<p>-Torque máximo y media de la extensión de pierna sentado. (handheld dynamometer (Lafayette Instruments))</p> <p>-Patient-Reported outcomes (PROs) (IKDC)</p> <p>-ROM de la rodilla</p> <p>-Efectos adversos</p>	<p>La integración de BFR en la fisioterapia perioperativa mejoró la fuerza y aumentó los PROs a las 6 semanas. No se encontraron diferencias en la fuerza o PRO a los 3 y 6 meses entre los 2 grupos.</p>	<p>2 semanas antes de la cirugía y 3 días (BFR) después de la cirugía.</p>
Viera de Melo et al (2022) (29)	<p>-Fuerza flexora y extensora isométrica del cuádriceps (Isometric Dynamometer)</p> <p>-Funcionalidad de la rodilla con el cuestionario Lhysholm, IKDC y KOOS.</p>	<p>Tras comparar la rehabilitación de los grupos, se observó una diferencia estadísticamente significativa en el cuádriceps, con un aumento de la fuerza muscular ($p<0,01$) tras 12 semanas, y un aumento de la fuerza muscular de los isquiotibiales ($p<0,01$) tras 8 y 12 semanas en las piernas lesionadas del grupo de intervención, en comparación con el grupo control. En el análisis de la función física de los participantes, se observó una diferencia significativa en el cuestionario Lysholm ($p<0,01$) tras 8 y 12 semanas; en el cuestionario de dolor KOOS ($p<0,01$) tras 4 semanas; en los síntomas y actividades diarias ($p<0,01$) tras 8 y 12 semanas; en la calidad de vida ($p<0,01$) tras 12 semanas; y en el cuestionario IKDC ($p<0,01$) tras 8 y 12 semanas; se observó una diferencia significativa en el grupo de intervención en comparación con el grupo control.</p> <p>El grupo que usó BFR demostró una ganancia más rápida de fuerza en cuádriceps e isquiotibiales y la función física en la rodilla.</p>	<p>Justo después de la fase de hospital</p>

Autores	Elegibility criteria	Random allocation	Concealed allocation	Baseline comparability	Blind subjects	Blind therapists	Blind assessors	Adequate follow-up	Intention-to-treat	Between group comparisons	Point estimates and variability	Total
Curran et al 2020	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	5
Erickson et al 2025	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	8
Hughes et al 2019	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	7
Iversen et al 2016	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	6
Li et al 2023	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4
Ohta et al 2003	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4
Okoroha et al 2023	0	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	5
Viera de melo et al 2022	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	7

Tabla 4. Escala de la metodología en fisioterapia PEDro



Figura 1. Diagrama de flujo que muestra el proceso de selección de (A) revisiones sistemáticas y (B) estudios primarios. Se indican el número de estudios incluidos y los motivos de exclusión.

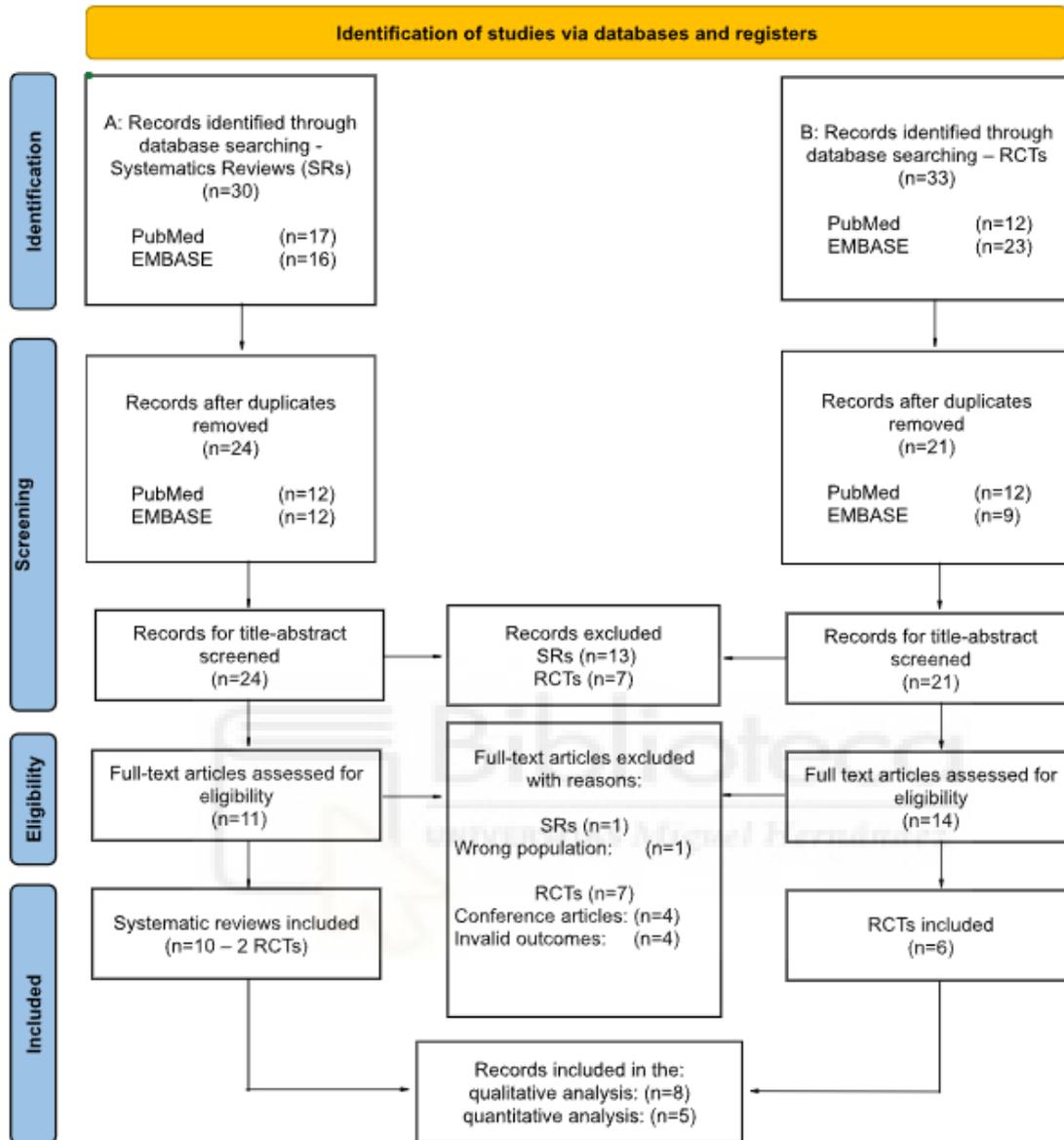


Figura 2A. Risk of bias; Juicio de dominios por estudio

	Random sequence generation (selection bias)	Allocation concealment (selection bias)	Blinding of participants and personnel (performance bias)	Blinding of outcome assessment (detection bias)	Incomplete outcome data (attrition bias)	Selective reporting (reporting bias)	Other bias
Curran et al 2020	+	+	-	-	+	+	+
Erickson et al 2025	+	+	-	+	+	+	+
Hughes et al 2019	+	+	-	+	+	+	+
Iversen et al 2016	+	-	-	+	+	+	?
Li et al 2023	+	-	-	-	-	+	?
Ohta et al 2003	+	-	-	+	+	+	?
Okorooha et al 2023	+	-	-	-	+	+	-
Viera de Melo et al 2022	+	+	-	-	+	+	-

Figura 2B. Risk of bias; Porcentaje global de riesgo observado en cada dominio

