

UNIVERSIDAD EUROPEA DE VALENCIA

Facultad de Ciencias de la Salud

Grado en Fisioterapia

Trabajo Fin de Grado

Curso 2024-2025

**EFFECTOS DEL ENTRENAMIENTO CON RESTRICCIÓN  
DEL FLUJO SANGUÍNEO SOBRE EL TENDÓN DE  
AQUILES: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA**



**Universidad  
Europea**

**Autores**

Louis DELAHAYE

Salomé POTIER

**Tutor/a**

Patricio ALBA QUESADA

Valencia, 2025



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>5</b>
2.1	Objetivo general .....	5
2.2	Objetivos específicos.....	5
<b>3</b>	<b>MATERIAL Y MÉTODOS .....</b>	<b>6</b>
3.1	Diseño del estudio.....	6
3.2	Criterios PICO.....	6
3.3	Bases de datos y ecuaciones de búsqueda .....	7
3.4	Criterios de inclusión y exclusión .....	8
3.5	Selección y extracción de datos.....	8
3.6	Evaluación de la calidad metodológica.....	9
3.7	Justificación de la ausencia de metaanálisis .....	11
3.8	Representación del proceso de selección - Diagrama PRISMA .....	12
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>18</b>
5.1	Resultados en pacientes con rotura del tendón de Aquiles .....	18
5.2	Adaptaciones morfológicas y mecánicas en sujetos sanos.....	18
5.3	Heterogeneidad metodológica y necesidad de estandarización .....	18
5.4	Evidencia externa y coherencia con la literatura actual.....	19
5.5	Implicaciones clínicas y futuras líneas de investigación.....	19
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>20</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>21</b>

## **Índice de tablas**

**Tabla 1.** Evaluación según la escala PEDro ..... 10

**Tabla 2.** Características y principales resultados de los estudios incluidos ..... 16

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Diagrama PRISMA de flujo de la información a través de las diferentes fases de la revisión. (16) .....	12
---	----

## **Índice de abreviaturas**

BEAN: Blood flow restriction Exercise in Achilles tendon rupture treated Non-surgically

BFR: Blood Flow Restriction (Entrenamiento con restricción del flujo sanguíneo)

CERT: Consensus on Exercise Reporting Template

CSA: Área de sección transversal

HI: High Intensity (Alta intensidad)

LI: Low Intensity (Baja intensidad)

LOP: Limb Occlusion Pressure (Presión de oclusión del miembro)

PRISMA: Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

PROMIS: Patient-Reported Outcomes Measurement Information System

RCT: Ensayo clínico aleatorizado

SPIRIT: Standard Protocol Items: Recommendations for Interventional Trials

TA: Tendón de Aquiles

## Resumen

### Introducción:

El tendón de Aquiles es una estructura crítica para la locomoción humana, frecuentemente afectada por tendinopatías y roturas. La rehabilitación post-lesión representa un desafío, especialmente en las fases iniciales cuando la carga debe ser limitada. El entrenamiento con restricción del flujo sanguíneo (BFR) ha emergido como una estrategia potencialmente eficaz para inducir adaptaciones musculares y tendinosas con baja carga.

### Objetivo:

Evaluar los efectos del BFR sobre las características morfológicas, funcionales y mecánicas del tendón de Aquiles, en poblaciones sanas y clínicas.

### Material y Métodos:

Se realizó una revisión sistemática según las directrices PRISMA. La búsqueda se llevó a cabo en siete bases de datos (PubMed, Cochrane, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Elsevier y EBSCO). Se identificaron 123 estudios, de los cuales seis ensayos clínicos aleatorizados cumplieron los criterios de inclusión.

**Resultados:** Los estudios mostraron que el BFR puede inducir mejoras relevantes en la función y estructura del tendón de Aquiles. En pacientes con rotura tendinosa, se reportaron aumentos del 14% en la fuerza del músculo sóleo ( $p=0.043$ ) y una menor pérdida de densidad mineral ósea ( $p=0.016$ ) tras 15 semanas de intervención. En sujetos sanos, se observaron reducciones agudas del grosor del tendón de hasta un 13,6% tras una única sesión de ejercicio ( $p<0.001$ ), y disminuciones mantenidas durante 24 horas ( $p<0.05$ ). Además, tras 14 semanas de entrenamiento, se obtuvieron mejoras comparables al ejercicio de alta carga en rigidez y área de sección transversal del tendón, sin diferencias significativas entre grupos.

### Conclusión:

El BFR ha demostrado efectos positivos en la fuerza, la estructura y la función del tendón de Aquiles, tanto en pacientes como en sujetos sanos. Representa una opción segura y eficaz cuando se requieren cargas reducidas. No obstante, la heterogeneidad de los protocolos y el escaso seguimiento limitan la extrapolación de los resultados. Se necesitan estudios más estandarizados y con mayor duración para confirmar su aplicación clínica.

**Palabras clave:** entrenamiento con BFR, tendón de Aquiles, fuerza muscular, rigidez tendinosa, grosor del tendón, adaptación estructural

## **Abstract**

### **Introduction:**

The Achilles tendon is a critical structure for human locomotion and is frequently affected by tendinopathy and rupture. Post-injury rehabilitation represents a major challenge, especially during the early stages when mechanical loading must be limited. Blood Flow Restriction (BFR) training has emerged as a potentially effective strategy to promote muscular and tendinous adaptations under low mechanical load conditions.

### **Objective:**

To evaluate the effects of BFR training on the morphological, functional, and mechanical characteristics of the Achilles tendon in both healthy individuals and clinical populations.

### **Material and Methods:**

A systematic review was conducted following PRISMA guidelines. The search was performed in seven electronic databases (PubMed, Cochrane, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Elsevier, and EBSCO). A total of 123 studies were identified, from which six randomized controlled trials met the inclusion criteria.

**Results:** The studies reviewed demonstrated that BFR can produce significant improvements in Achilles tendon function and structure. In patients with tendon rupture, increases of 14% in soleus muscle strength ( $p=0.043$ ) and reduced bone mineral loss ( $p=0.016$ ) were reported after 15 weeks of intervention. In healthy individuals, acute reductions in tendon thickness of up to 13.6% were observed after a single BFR session ( $p<0.001$ ), with effects lasting up to 24 hours ( $p<0.05$ ). Additionally, after 14 weeks of training, BFR induced improvements in tendon stiffness and cross-sectional area comparable to high-load training, with no significant differences between groups.

### **Conclusion:**

BFR has shown positive effects on Achilles tendon strength, structure, and function in both patients and healthy individuals. It appears to be a safe and effective option when high mechanical loads are not feasible. However, protocol heterogeneity and limited follow-up reduce the generalizability of current findings. Further standardized and long-term studies are needed to support its clinical application.

**Keywords:** BFR training, Achilles tendon, muscle strength, tendon stiffness, tendon thickness, structural adaptation

# 1 INTRODUCCIÓN

El tendón de Aquiles (TA), uno de los tendones más fuertes y gruesos del cuerpo humano junto con los músculos de la pantorrilla (complejo músculo-tendinoso), permite realizar actividades básicas y funcionales como caminar, correr y saltar. Esto es posible no solo por su transmisión de fuerza, sino también por el almacenamiento y retorno de energía durante la locomoción (1). La literatura científica ha demostrado que las propiedades morfológicas y estructurales del tendón de Aquiles pueden verse alteradas por el esfuerzo mecánico, especialmente en respuesta a actividades de alto impacto como correr y saltar, lo que puede inducir cambios en su grosor y estructura histológica. Actividades como correr y saltar, cuando se realizan durante un tiempo prolongado, pueden dar lugar a un mayor grosor del TA en comparación con actividades regulares (2). De hecho, esto se correlaciona con un aumento del comportamiento fisiopatológico debido a la degeneración del tejido tendinoso, aumentando el riesgo de tendinopatía o rotura del tendón (1,3).

La rotura del tendón de Aquiles es una lesión frecuente, con tasas de incidencia cada vez mayores que provocan largos periodos de baja laboral, déficits en la función física y una disminución de la actividad física (4). No solo la rotura, sino también la tendinopatía del TA es una afección común que afecta a una gran parte de la población atlética, especialmente a los corredores. La comprensión de los factores que contribuyen a la tendinopatía del TA es crucial para el desarrollo de estrategias de prevención y tratamiento efectivas. Se estima que la incidencia varía entre el 5-10% en corredores y atletas de resistencia, alcanzando hasta un 50% en deportes de impacto como baloncesto y voleibol (5,7).

Los programas de rehabilitación que han demostrado buenos resultados en la reducción del dolor y la reincorporación al deporte suelen incluir el entrenamiento de fuerza (8). La activación muscular puede inducir analgesia, mejorando la autoeficacia asociada a la reducción del propio dolor. Además, el entrenamiento de fuerza es beneficioso para la estructura de la matriz tendinosa, las propiedades musculares y la biomecánica de la extremidad. Otros métodos alternativos utilizados para tratar la tendinopatía aquilea incluyen ejercicios excéntricos, que han demostrado ser efectivos en la reducción del dolor y la mejora funcional del tendón (9). En los últimos años, estudios han demostrado la eficacia del entrenamiento de resistencia de baja intensidad asociado a la restricción del flujo sanguíneo (LI-BFR) como estrategia alternativa al entrenamiento de resistencia de alta intensidad [ $>75\%$  de una repetición máxima (RM)] para conseguir hipertrofia muscular y ganancias de fuerza (10).

Este método representa una posible alternativa para evitar la atrofia muscular de la extremidad inferior, equilibrando al mismo tiempo la estimulación del músculo-tendón de la pierna y la inmovilización en la fase inicial de la rehabilitación de la rotura del tendón de Aquiles, aplicando el ejercicio de restricción del flujo sanguíneo (BFRE) (11,12).

El BFRE consiste en ejercitarse con un manguito neumático inflado para restringir parcialmente el flujo sanguíneo arterial a los músculos activos, a bajas intensidades de carga externa, normalmente en el rango del 10-30 % de una repetición máxima. Esta restricción del flujo sanguíneo a los músculos activos aumenta el estrés metabólico y mecánico, lo que promueve una respuesta anabólica (5,13). Se ha demostrado que el entrenamiento con cargas bajas, cuando se realiza cerca del fallo muscular momentáneo, puede provocar hipertrofia muscular. Gracias a la restricción del flujo sanguíneo, se puede conseguir hipertrofia con menos repeticiones en comparación con el entrenamiento convencional de resistencia con cargas bajas(4). Además, se ha observado que permite mayores adaptaciones neuromusculares en comparación con el entrenamiento de baja intensidad sin restricción de flujo (14).

Los mecanismos adaptativos del BFRE no se conocen del todo, pero se ha propuesto que el entorno hipóxico resultante del estrés metabólico junto con la tensión mecánica induce un aumento de los niveles de producción sistemática de hormonas, inflamación de las células musculares y proliferación de células madre miogénicas, además de un mayor reclutamiento de unidades motoras de tipo II (15). El sistema nervioso simpático (SNS) desempeña un papel importante en el control de la vascularización local y el metabolismo tisular en respuesta al estrés fisiológico a través del ejercicio (7). En particular, se han descrito terminaciones nerviosas simpáticas en el tejido para tendinoso ventral al Aquiles (13). Un estrés mecánico inadecuado puede contribuir a una alteración de la histéresis del tendón para disipar la energía térmica y, a su vez, provocar una alteración del metabolismo celular y de su capacidad para tolerar la carga y mantener la homeostasis (5). Los efectos del ejercicio sobre el aumento del flujo sanguíneo al tejido de trabajo están estrechamente relacionados con los cambios en la temperatura de la piel (5). Cuando los músculos se contraen, se produce un aumento de la temperatura interna como subproducto del aumento del metabolismo muscular (7). Los aumentos de temperatura se disipan mediante el intercambio de calor del músculo a la sangre y a través de la conducción desde los músculos en funcionamiento a los tejidos circundantes y la piel (7).

Además, el BFRE se considera una modalidad de ejercicio segura y eficaz en diversas poblaciones de pacientes musculoesqueléticos (4). No obstante, es fundamental comparar su efectividad con los métodos tradicionales de rehabilitación que no utilizan BFR.

Estos hallazgos recientes justifican una mayor investigación sobre el posible papel del BFR en el tratamiento de la tendinopatía aquilea, especialmente en aquellas personas que no toleran el ejercicio de resistencia intenso.

Es importante destacar que ha habido pruebas que muestran apoyo para el uso del ejercicio de BFR de baja carga en la adaptación del tejido tendinoso, informando de un aumento en el área transversal y la rigidez del Aquiles (6). También se ha sugerido recientemente el uso del ejercicio BFR de baja carga para provocar una respuesta analgésica, aunque no específica para el tendón de Aquiles (5).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar los efectos del entrenamiento con restricción del flujo sanguíneo (BFR) sobre las características morfológicas, funcionales y mecánicas del tendón de Aquiles, mediante una revisión sistemática de ensayos clínicos aleatorizados realizados en sujetos con tendinopatía, rotura del tendón o en individuos sanos.

### **2.2 Objetivos específicos**

Analizar los efectos del BFR sobre la morfología y propiedades mecánicas del tendón de Aquiles (grosor, rigidez, área de sección transversal).

Evaluar el impacto del BFR sobre la fuerza muscular, el dolor y la función en sujetos con alteraciones del tendón de Aquiles o en individuos sanos

Comparar los efectos del ejercicio con BFR frente a intervenciones convencionales o ausencia de intervención.

Identificar posibles riesgos, efectos adversos y la seguridad general del uso del BFR en este contexto.

### 3 MATERIAL Y MÉTODOS

#### 3.1 Diseño del estudio

Esta revisión sistemática se realizó siguiendo las directrices PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), con el fin de garantizar un proceso riguroso y transparente. Su objetivo fue evaluar los efectos del ejercicio con restricción del flujo sanguíneo (BFR, por sus siglas en inglés) sobre el tendón de Aquiles en adultos con tendinopatía, ruptura del tendón o individuos sanos, considerando tanto contextos de rehabilitación como de entrenamiento controlado.

La revisión se centró en analizar el impacto del BFR sobre variables estructurales (como el grosor, la rigidez o el área de sección transversal del tendón), mecánicas (resistencia y elasticidad), funcionales (movilidad, reincorporación a la actividad física) y clínicas (dolor, fuerza muscular).

Según la Cochrane, una revisión sistemática es una "diligente y rigurosa recopilación, evaluación y síntesis de la literatura científica existente, minimizando la aparición de sesgos y errores aleatorios". Siguiendo este enfoque, hemos estructurado nuestra metodología en diversas fases, detalladas a continuación.

#### 3.2 Criterios PICO

Para delimitar nuestra pregunta de investigación y establecer una búsqueda estructurada, empleamos el modelo **PICO (Population, Intervention, Comparison, Outcomes)**, ampliamente utilizado en revisiones sistemáticas:

Criterio	Definición	Palabras Clave
Población	Sujetos adultos sanos o con tendinopatía o rotura del tendón de Aquiles	"Achilles tendon", "Achilles tendon rupture", "Achilles tendinopathy"
Intervención	Ejercicio o programa de entrenamiento con restricción del flujo sanguíneo (BFR) aplicado a miembros inferiores	"Blood flow restriction", "restricted blood flow", "occlusion training"
Comparación	Rehabilitación convencional sin BFR o sin intervención	"Conventional rehabilitation", "No intervention"
Resultados	Cambios en morfología del tendón (grosor, CSA), fuerza, rigidez, dolor, función u otras variables clínicas	"Tendon thickness", "Tendon morphology", "Strength", "Pain", "Function", "Stiffness"

### 3.3 Bases de datos y ecuaciones de búsqueda

Se llevó a cabo una búsqueda sistemática en diversas bases de datos electrónicas reconocidas por su relevancia en ciencias de la salud:

- **PubMed** (Medicina y fisioterapia)
- **ScienceDirect** (Plataforma de Elsevier con estudios clínicos y revisiones)
- **Web of Science** (Multidisciplinaria con alto rigor científico)
- **Cochrane** (Base de revisiones sistemáticas de alta calidad)
- **Scopus** (Amplia cobertura de estudios biomédicos)
- **EBSCO Biblioteca José Crai** (Acceso a publicaciones científicas internacionales)
- **Elsevier** (Editorial con artículos científicos en fisioterapia y medicina)

La búsqueda se realizó con términos combinados mediante operadores booleanos (AND, OR):

- ("**Blood Flow Restriction**" OR "**BFR**") AND ("**Achilles tendon**" OR "**Achilles tendinopathy**" OR "**Achilles rupture**") AND ("**rehabilitation**" OR "**recovery**" OR "**exercise**")

Se identificaron un total de **123 estudios**:

- PubMed: 10
- ScienceDirect: 46
- Web of Science: 14
- Cochrane: 6
- Scopus: 24
- EBSCO Biblioteca José Crai: 5
- Elsevier: 18

Se utilizó la plataforma **Rayyan** para la detección automática de duplicados y la selección de artículos. Dos revisores realizaron la lectura de los artículos de manera ciega e independiente para evitar sesgos en la selección. Posteriormente, se compararon los estudios elegidos por cada revisor y se llegó a un consenso final.

Se eliminaron **34 estudios duplicados**, dejando **89 estudios únicos**. Posteriormente, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión, resultando en **6 estudios seleccionados** para la revisión final.

### 3.4 Criterios de inclusión y exclusión

Para seleccionar los estudios más relevantes y asegurar la calidad de la revisión, se establecieron los siguientes **criterios de inclusión y exclusión**:

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Ensayos clínicos aleatorizados publicados en inglés o español	Estudios de caso, revisiones narrativas y estudios en animales
Sujetos adultos con tendinopatía o rotura del tendón de Aquiles, o individuos sanos.	Artículos sin acceso a texto completo
Evaluación de la efectividad del BFR en rehabilitación (morfológicas, funcionales, clínicas o mecánicas)	Estudios que no reportan datos cuantificables
Comparación con rehabilitación convencional o ausencia de intervención	Patologías diferentes al tendón de Aquiles

### 3.5 Selección y extracción de datos

Dos revisores independientes analizaron los títulos y resúmenes de los artículos identificados. En caso de desacuerdo, un tercer revisor intervino para resolver discrepancias. Los estudios seleccionados fueron evaluados en texto completo y los datos extraídos incluyeron:

- Datos generales (autor, año, país, diseño del estudio, número de participantes).
- Características de la intervención (duración, presión de oclusión, tipo de ejercicio, frecuencia).
- Resultados primarios y secundarios medidos en cada estudio.

### 3.6 Evaluación de la calidad metodológica

La calidad de los estudios incluidos se evaluó mediante la escala **PE德罗**, que valora la validez interna y externa de los ensayos clínicos en una escala de 0 a 11 puntos. Los estudios se categorizaron según su puntuación:

- **9-11 puntos:** Calidad excelente.
- **6-8 puntos:** Calidad buena.
- **4-5 puntos:** Calidad moderada.
- **0-3 puntos:** Calidad baja.

A continuación, se presenta la puntuación obtenida por cada estudio incluido, lo que permite observar su solidez metodológica y la fiabilidad de sus resultados:

- **Lambert et al. (2024):** 9/11 → **Calidad buena**
- **Zusmanovich et al. (2021):** 6/11 → **Calidad buena**
- **Chulvi-Medrano et al. (2021):** 7/11 → **Calidad buena**
- **Hansen et al. (2021):** 9/11 → **Calidad buena**
- **Picón-Martínez et al. (2021):** 6/11 → **Calidad buena**
- **Centner et al. (2019):** 8/11 → **Calidad buena**

Cabe destacar que, aunque ninguno de los estudios alcanzó una puntuación excelente, todos cumplieron con criterios metodológicos fundamentales como la aleatorización y el reporte de datos completos. Sin embargo, una limitación común observada fue la falta de cegamiento tanto de los participantes como de los terapeutas, lo cual es comprensible dada la naturaleza del ejercicio físico como intervención.

Esta información se sintetiza en la **Tabla 1**, donde se desglosan todos los ítems de la escala PEDro para cada estudio, lo que permite una visión detallada de sus fortalezas y debilidades metodológicas.

**Tabla 1.** Evaluación según la escala PEDro

Estudio	1. Criterios de elegibilidad especificados	2. Asignación aleatoria	3. Asignación oculta	4. Similitud de grupos al inicio	5. Cegamiento de sujetos	6. Cegamiento de terapeutas	7. Cegamiento de evaluadores	8. <15% de abandonos	9. Análisis por intención de tratar	10. Comparación estadística entre grupos	11. Medidas puntuales y de variabilidad	Total
Lambert et al. (2024)	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	<b>9</b>
Zusmanovich et al. (2021)	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	<b>6</b>
Chulvi-Medrano et al. (2021)	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	<b>7</b>
Hansen et al. (2021)	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	<b>9</b>
Picón-Martínez et al. (2021)	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	<b>6</b>
Centner et al. (2019)	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	<b>8</b>

### **3.7 Justificación de la ausencia de metaanálisis**

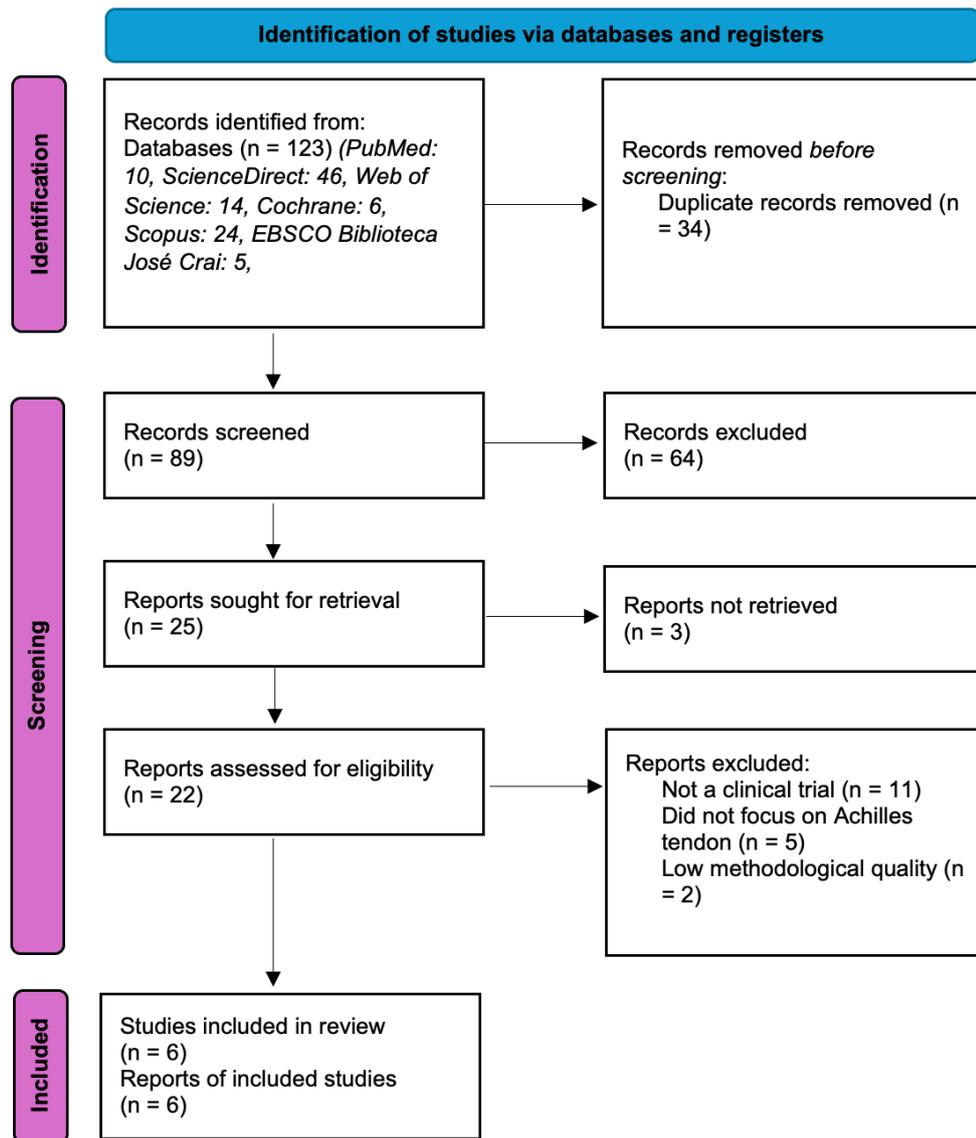
No se realizó un metaanálisis debido a las siguientes razones:

1. Alta heterogeneidad de los estudios: Diferencias en las características de los participantes (diferencias en el tipo de intervención, duración y mediciones clínicas), los protocolos de intervención y las medidas de resultado.
2. Falta de datos estandarizados: Varios estudios no reportaron estadísticas comparables como medias y desviaciones estándar.
3. Bajo número de estudios disponibles: Solo se identificaron 6 ensayos clínicos elegibles, lo que impide realizar un análisis estadístico sólido y confiable.

Dado el alto grado de heterogeneidad en las poblaciones y los métodos de evaluación entre los estudios incluidos, se optó por un análisis narrativo de los resultados en lugar de un metaanálisis. Se agruparon los hallazgos en función de las variables de interés (morfología del tendón, fuerza muscular, función y recuperación) y se compararon cualitativamente los efectos del BFR frente a la rehabilitación convencional.

### 3.8 Representación del proceso de selección - Diagrama PRISMA

A continuación, se presenta el diagrama PRISMA actualizado, detallando el proceso de selección de los estudios incluidos en la revisión.



**Figura 1.** Diagrama PRISMA de flujo de la información a través de las diferentes fases de la revisión. (16)

## 4 RESULTADOS

A continuación, se presentan los hallazgos principales extraídos de los seis estudios clínicos incluidos en esta revisión sistemática. Todos ellos evaluaron los efectos del ejercicio con restricción del flujo sanguíneo (BFR) sobre distintas variables relacionadas con el tendón de Aquiles, ya sea en contextos de rehabilitación postquirúrgica, tendinopatía o en sujetos sanos.

De manera general, los estudios realizados en pacientes con rotura del tendón de Aquiles (Lambert et al., Hansen et al., y Zusmanovich et al.) evidencian que el BFR puede contribuir a preservar la masa muscular y ósea, y mejorar la fuerza muscular sin incrementar el riesgo de complicaciones. Las investigaciones llevadas a cabo en sujetos sanos (Chulvi-Medrano et al., Picón-Martínez et al., y Centner et al.) demuestran efectos positivos del BFR sobre la morfología tendinosa y propiedades mecánicas del tendón, tanto a nivel agudo como tras programas de entrenamiento estructurado. Estos resultados sugieren que el BFR puede inducir adaptaciones estructurales comparables o incluso superiores a las del entrenamiento convencional de alta carga, con una carga significativamente menor.

A continuación, se detallan los resultados individuales de cada estudio, con énfasis en las características de los participantes, el tipo de intervención aplicada, las variables analizadas, la duración del seguimiento y los resultados estadísticamente significativos reportados.

### **Lambert et al. (2024)**

Este ensayo clínico aleatorizado incluyó a 19 pacientes varones con rotura del tendón de Aquiles tratada quirúrgicamente. Los participantes fueron distribuidos en dos grupos: un grupo experimental que realizó un programa de rehabilitación funcional con entrenamiento con restricción del flujo sanguíneo (BFR) (n=7) y un grupo control que siguió una rehabilitación convencional (n=12). La intervención con BFR se desarrolló durante 15 semanas, con ejercicios aplicados al 80% de la presión de oclusión arterial individual.

Las variables de resultado evaluadas incluyeron la densidad mineral ósea (BMD) de la tibia distal, la masa muscular de la pantorrilla y la fuerza isométrica del músculo sóleo. Los resultados mostraron una reducción significativamente menor de la BMD en el grupo BFR en comparación con el grupo control ( $p=0.016$ ), indicando un efecto protector sobre el hueso. Además, la fuerza del sóleo fue significativamente mayor en el grupo BFR tras 16 semanas de rehabilitación ( $p=0.043$ ), y se observó una menor pérdida de masa muscular en la pantorrilla operada. Estos hallazgos sugieren que el BFR puede ser útil para preservar la integridad musculoesquelética durante la rehabilitación postoperatoria.

### **Hansen et al. (2021)**

En este estudio aleatorizado controlado, se evaluó el efecto del BFR sobre la recuperación funcional tras reparación quirúrgica del tendón de Aquiles. Se incluyeron 43 pacientes varones, con una edad media aproximada de  $39 \pm 10$  años, divididos en grupo BFR (n=24) y grupo control (n=19). El grupo experimental inició ejercicios de carga con BFR a partir de la segunda semana postoperatoria, integrados dentro de un programa progresivo de rehabilitación.

Las variables principales fueron la fuerza absoluta en flexión plantar, la circunferencia de la pantorrilla y las puntuaciones funcionales en la escala PROMIS. A los tres meses, se observó una fuerza significativamente mayor en la pierna operada en el grupo BFR ( $p < 0.05$ ). No hubo diferencias significativas en la fuerza relativa ni en la fuerza de extensión de rodilla. También se observó una tendencia positiva en la circunferencia de la pantorrilla en el grupo BFR, aunque sin alcanzar significación estadística. El seguimiento fue de 6 meses, y no se reportaron efectos adversos, lo que respalda la seguridad y aplicabilidad clínica del BFR.

### **Chulvi-Medrano et al. (2021)**

Este estudio con diseño intrasujeto evaluó a 56 hombres sanos con experiencia previa en entrenamiento de resistencia (edad media: ~24 años). Cada participante realizó una única sesión de ejercicio unilateral de baja carga con BFR (30% 1RM, 30% oclusión) en una pierna, mientras que la pierna contralateral se entrenó con la misma carga, pero sin BFR.

Se utilizó ecografía para medir el grosor del tendón de Aquiles en cuatro momentos: antes del ejercicio, inmediatamente después, a los 60 minutos y a las 24 horas post ejercicio. En la pierna entrenada con BFR, se observó una disminución significativa del grosor del tendón inmediatamente después del ejercicio, que se mantuvo a los 60 minutos y a las 24 horas (reducción media del 9.2%,  $p < 0.05$ ). En la pierna sin BFR, el grosor se recuperó a los valores basales en menos de 24 horas. El tamaño del efecto fue grande ( $g = 0.90$ ), indicando un fuerte impacto agudo del BFR sobre el tejido tendinoso.

### **Zusmanovich et al. (2021)**

Este estudio retrospectivo de cohorte comparó los resultados de 108 pacientes varones sometidos a reparación quirúrgica del tendón de Aquiles, de los cuales 19 recibieron BFR como complemento a un protocolo de rehabilitación funcional acelerada, y 89 fueron tratados únicamente con rehabilitación estándar.

La principal variable analizada fue la circunferencia de la pantorrilla como medida indirecta de atrofia muscular. Aunque el grupo BFR mostró una tendencia a una menor pérdida de circunferencia, las diferencias no fueron estadísticamente significativas. Tampoco se observaron diferencias en la incidencia de complicaciones postoperatorias, lo que sugiere que el uso de BFR es seguro, pero requiere más evidencia en este contexto clínico. El estudio, aunque relevante, presenta limitaciones por su diseño no aleatorizado y la heterogeneidad de las mediciones.

### **Picón-Martínez et al. (2021)**

Este ensayo clínico aleatorizado investigó los efectos agudos del BFR sobre el tendón de Aquiles tras una única sesión de ejercicio. Participaron 52 sujetos (edad media:  $27.3 \pm 7$  años) distribuidos en tres grupos: baja carga con BFR ( $n=24$ ), baja carga sin BFR ( $n=13$ ), y alta carga ( $n=15$ ). Todos realizaron flexiones plantares, y se utilizó ecografía para medir el grosor del tendón antes y después del ejercicio (inmediatamente, 60 minutos y 24 horas).

Solo el grupo LI-BFR presentó una reducción significativa del grosor del tendón en todas las mediciones posteriores al ejercicio ( $p < 0.001$ ), mientras que los otros grupos no mostraron cambios. Esto sugiere que el BFR puede inducir una respuesta morfológica aguda única en el tendón, potencialmente relacionada con mecanismos de adaptación o remodelado.

### **Centner et al. (2019)**

Este estudio aleatorizado incluyó 29 hombres sanos (edad media:  $25 \pm 4$  años, asignados a un grupo de entrenamiento con BFR ( $n=14$ ) o a un grupo de alta carga ( $n=15$ ). Ambos realizaron un programa de entrenamiento de 14 semanas enfocado en el tríceps sural (gemelos y sóleo), con el grupo BFR trabajando al 30% 1RM con presión moderada de oclusión.

Se evaluaron la rigidez del tendón de Aquiles y su área transversal (CSA) mediante métodos biomecánicos y ecográficos. Ambos grupos mostraron mejoras significativas en las propiedades del tendón, sin diferencias significativas entre ellos. Estos resultados indican que el entrenamiento con BFR puede producir adaptaciones estructurales comparables al entrenamiento tradicional de alta carga, ofreciendo una alternativa válida y menos agresiva para el tejido tendinoso.

**Tabla 2.** Características y principales resultados de los estudios incluidos.

Estudio	Diseño	Participantes (n) y edad media	Intervención	Control	Medidas de resultado	Seguimiento	Resultados
Lambert et al. (2024)	RCT	19 pacientes (100% varones), edad media no especificada	15 semanas de rehabilitación con BFR al 80% de la oclusión arterial	Rehabilitación convencional	BMD tibial, masa muscular pantorrilla, fuerza (sóleo)	16 semanas	El grupo BFR mostró una menor pérdida de masa ósea en la tibia distal ( $p=0.016$ ), mayor fuerza del sóleo ( $p=0.043$ ), y menor atrofia muscular medida por volumen de tejido blando. No se observaron efectos adversos. La diferencia en BMD se mantuvo tras 16 semanas de seguimiento.
Hansen et al. (2021)	RCT	43 pacientes (100% varones), edad media: $39 \pm 10$ años	BFR con ejercicios desde semana 2 postoperatoria	Rehabilitación convencional	Fuerza plantar, circunferencia de pantorrilla, PROMIS	6 meses	El grupo BFR mostró una mayor fuerza plantar absoluta a los 3 meses ( $p<0.05$ ), sin diferencias en la fuerza relativa ni en la extensión de rodilla. Tendencia no significativa a mayor circunferencia de pantorrilla. No se reportaron efectos adversos. Los resultados clínicos (PROMIS) fueron similares entre grupos.
Chulvi-Medrano et al. (2021)	Intrasujeto	56 sujetos sanos (100% hombres), edad media: $\sim 24$ años	1 sesión LI-BFR (30% 1RM, 30% oclusión)	LI sin BFR (pierna contralateral)	Grosor del tendón de Aquiles (ecografía)	24 horas post-ejercicio	LI-BFR redujo significativamente el grosor del tendón de Aquiles en un 9.2% ( $p<0.05$ ), efecto mantenido hasta las 24h post-ejercicio. La pierna contralateral (sin BFR) no mostró cambios. Se interpretó

							como respuesta aguda al estrés hipóxico y mecánico del tendón.
Zusmanovich et al. (2021)	Cohorte retrospectiva	108 pacientes (100% varones), edad media no especificada	BFRT 1 rehabilitación funcional acelerada	Rehabilitación funcional acelerada sola	Circunferencia de pantorrilla	≥3 meses	Tendencia a menor diferencia en circunferencia de pantorrilla entre piernas (NS), sin diferencias en tasas de complicaciones (infección, rerrotura). El estudio sugiere seguridad del BFR en protocolos acelerados de rehabilitación pero carece de significación estadística.
Picón-Martínez et al. (2021)	RCT	52 sujetos (edad media: 27.3 ± 7 años), sexo no especificado	LI-BFR (30% 1RM, 30% oclusión), 4 series de ejercicios	LI y HI	Grosor del tendón (ecografía)	Inmediatamente, 60 min, 24 h post-ejercicio	El grupo LI-BFR mostró una reducción significativa del grosor del tendón inmediatamente, a los 60 minutos y a las 24h post-ejercicio ( $p < 0.001$ ). Los grupos LI y HI no mostraron cambios. El estudio sugiere que el BFR induce respuestas morfológicas agudas únicas.
Centner et al. (2019)	RCT	29 sujetos (edad media: 25 ± 4 años, 100% hombres)	LI-BFR entrenamiento gemelo/sóleo (14 semanas)	Entrenamiento de alta carga	Área transversal, rigidez tendón Aquiles	14 semanas	Ambos grupos (BFR y alta carga) mejoraron significativamente la CSA y rigidez del tendón de Aquiles tras 14 semanas. No hubo diferencias significativas entre grupos. Se observó una adaptación tendinosa comparable con menor carga externa en el grupo BFR.

## **5 DISCUSIÓN**

El objetivo principal de esta revisión sistemática fue analizar los efectos del entrenamiento con restricción del flujo sanguíneo (BFR) sobre el tendón de Aquiles, tanto en poblaciones clínicas (rotura o tendinopatía) como en sujetos sanos. Los resultados de los seis ensayos clínicos incluidos muestran que el BFR puede tener un efecto beneficioso en la recuperación funcional, la preservación muscular y la adaptación estructural del tendón, con escasos eventos adversos reportados.

### **5.1 Resultados en pacientes con rotura del tendón de Aquiles**

Tres de los estudios incluidos evaluaron pacientes postquirúrgicos o en rehabilitación funcional. Lambert et al. demostraron mejoras significativas en la fuerza del sóleo y menor pérdida de masa ósea y muscular tras 15 semanas de rehabilitación con BFR. Hansen et al. (16) observaron un incremento significativo en la fuerza plantar absoluta tras 3 meses de BFR iniciado en la segunda semana postoperatoria, destacando además la buena adherencia y seguridad del protocolo. Zusmanovich et al. (17), aunque con un diseño retrospectivo, también reportaron una tendencia a menor atrofia muscular en pacientes con BFR, sin diferencias en complicaciones.

Estos hallazgos refuerzan la viabilidad de aplicar BFR en fases tempranas del tratamiento postquirúrgico o conservador. Sin embargo, la falta de estandarización en los protocolos, la duración variable de las intervenciones y las diferencias en las variables evaluadas dificultan la comparación directa entre estudios.

### **5.2 Adaptaciones morfológicas y mecánicas en sujetos sanos**

En sujetos sanos, el BFR mostró efectos positivos tanto agudos como crónicos. Chulvi-Medrano et al. (10) y Picón-Martínez et al. (18) observaron una reducción significativa del grosor del tendón de Aquiles tras una sola sesión de ejercicio con BFR, efecto que persistía hasta 24 horas. Por su parte, Centner et al. (6) demostraron que 14 semanas de entrenamiento con BFR inducen mejoras similares a las del entrenamiento de alta carga en la rigidez y área transversal del tendón. Estos estudios respaldan el potencial del BFR como herramienta de acondicionamiento en contextos preventivos o de bajo impacto.

### **5.3 Heterogeneidad metodológica y necesidad de estandarización**

Uno de los desafíos principales identificados en esta revisión es la falta de estandarización en los protocolos de BFR: las presiones de oclusión varían entre estudios (60–80% del LOP), las frecuencias y tipos de ejercicios son dispares, y los seguimientos son heterogéneos. Esto limita la extrapolación de los resultados y la implementación clínica uniforme.

En este sentido, el protocolo BEAN (Bentzen et al., 2024) (4) propone un enfoque estandarizado, basado en un diseño multicéntrico, aleatorizado y con fases claramente estructuradas de progresión, lo que puede servir como modelo de referencia para futuros ensayos. Este protocolo incluye la progresión del BFR desde ejercicios de cadena abierta en posición sentada hasta ejercicios de carga más funcionales (press de pierna, elevaciones de talones) con presiones claramente definidas y ajustadas individualmente, siguiendo las recomendaciones del marco CERT(19) y SPIRIT(20). Su implementación podría facilitar la comparabilidad entre estudios y avanzar hacia una guía clínica del uso del BFR en patología del tendón de Aquiles.

#### **5.4 Evidencia externa y coherencia con la literatura actual**

Los hallazgos aquí discutidos son consistentes con otras revisiones sistemáticas recientes que han demostrado los beneficios del BFR en contextos musculoesqueléticos. Por ejemplo, Hughes et al. (3) y Vopat et al.(21) resaltan el potencial del BFR como modalidad segura y eficaz para preservar fuerza y masa muscular en poblaciones clínicas, y sugiere su inclusión como parte del abordaje fisioterapéutico integral. Asimismo, Schoenfeld et al.(22) documentan en meta-análisis que el BFR genera hipertrofia comparable al entrenamiento tradicional con cargas altas, con menor riesgo para estructuras comprometidas como los tendones.

#### **5.5 Implicaciones clínicas y futuras líneas de investigación**

El uso del BFR en el tendón de Aquiles, aunque prometedor, aún requiere consolidación mediante estudios de mayor calidad metodológica y muestras más amplias. Se propone:

- La inclusión de medidas avanzadas como elastografía ecográfica, análisis de biomarcadores inflamatorios o regenerativos, y medición de elongación tendinosa.
- Estudios comparativos entre protocolos de BFR iniciados temprana vs. tardíamente, como plantea el BEAN(4) .
- Análisis costo-efectividad en contextos clínicos reales.
- Evaluación de resultados a largo plazo ( $\geq 1$  año) sobre funcionalidad y reincorporación deportiva.

## 6 CONCLUSIONES

El entrenamiento con restricción del flujo sanguíneo (BFR) ha demostrado producir adaptaciones positivas en la morfología y las propiedades mecánicas del tendón de Aquiles, como reducciones agudas en el grosor tras sesiones aisladas y mejoras crónicas en la rigidez y el área de sección transversal (CSA) tras programas prolongados. Estos efectos se han observado tanto en sujetos sanos como en poblaciones clínicas, y en algunos casos han sido comparables a los obtenidos mediante entrenamiento de alta carga, lo cual es especialmente relevante para etapas tempranas de la rehabilitación donde no se permite una carga elevada.

En términos funcionales, el BFR ha contribuido a mejorar la fuerza muscular en distintas fases de recuperación, destacando un aumento significativo de la fuerza plantar en pacientes postquirúrgicos. Sin embargo, aunque algunos estudios sugieren una mejor recuperación funcional, los efectos sobre el dolor y la movilidad no han sido reportados de forma sistemática ni uniforme, lo que limita las conclusiones sobre estos aspectos y sugiere la necesidad de más estudios centrados en variables clínicas.

Al comparar el BFR con intervenciones convencionales, se han observado resultados equivalentes o superiores en variables clave como la fuerza, la morfología tendinosa y la preservación de la masa muscular, lo cual refuerza su valor como herramienta terapéutica alternativa o complementaria. Esto resulta especialmente útil en contextos donde no es viable aplicar cargas elevadas, como en etapas agudas o pacientes con contraindicación a entrenamiento intenso.

Respecto a la seguridad, el BFR ha sido bien tolerado en todos los estudios incluidos, sin reportarse efectos adversos relevantes, como trombosis, lesiones o dolor exacerbado. Estos hallazgos sugieren que, bajo protocolos controlados, el BFR puede considerarse una técnica segura en el contexto de la fisioterapia musculoesquelética. No obstante, se destaca la falta de homogeneidad entre los protocolos aplicados. En consecuencia, se recomienda avanzar hacia una mayor estandarización de los procedimientos, tomando como referencias iniciativas como el protocolo BEAN(4), basado en directrices metodológicas como SPIRIT(20) y CERT(19), para facilitar la comparación entre estudios y guiar su implementación clínica

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Yow BG, Tennent DJ, Dowd TC, Loenneke JP, Owens JG. Blood Flow Restriction Training After Achilles Tendon Rupture. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*. mayo de 2018;57(3):635-8.
2. Bohm S, Mersmann F, Arampatzis A. Human tendon adaptation in response to mechanical loading: a systematic review and meta-analysis of exercise intervention studies on healthy adults. *Sports Med - Open*. diciembre de 2015;1(1):7.
3. Hughes L, B P, B R, C G, Sd P. Blood flow restriction training in clinical musculoskeletal rehabilitation: a systematic review and meta-analysis. *PubMed [Internet]*. [citado 25 de febrero de 2025]; Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28259850/>
4. Bentzen A, Gundtoft PH, Silbernagel KG, Jørgensen SL, Mechlenburg I. The effectiveness of low-load Blood flow restriction Exercise in patients with an acute Achilles tendon rupture treated Non-surgically (BEAN): Protocol for a randomized controlled trial. *The Foot*. diciembre de 2024;61:102133.
5. Canfer RJ, Chaudry S, Miller SC. Thermographic assessment of the immediate and short term-effects of blood flow restriction exercise on Achilles tendon skin temperature. *Physical Therapy in Sport*. mayo de 2021;49:171-7.
6. Centner C, Lauber B, Seynnes OR, Jerger S, Sohnius T, Gollhofer A, et al. Low-load blood flow restriction training induces similar morphological and mechanical Achilles tendon adaptations compared with high-load resistance training. *Journal of Applied Physiology*. 1 de diciembre de 2019;127(6):1660-7.
7. Kenny GP, Reardon FD, Zaleski W, Reardon ML, Haman F, Ducharme MB. Muscle temperature transients before, during, and after exercise measured using an intramuscular multisensor probe. *Journal of Applied Physiology*. 1 de junio de 2003;94(6):2350-7.
8. Pinzón Ríos ID. Dolor y Ejercicio. *archmed*. 20 de junio de 2018;18(1):181-200.
9. Arnal-Gómez A, Espí-López GV, Cano-Heras D, Muñoz-Gómez E, Balbastre Tejedor I, Ramírez-Iñiguez De La Torre MV, et al. Revisión bibliográfica sobre la eficacia del ejercicio excéntrico como tratamiento para la tendinopatía del tendón de Aquiles. *aprl*. 15 de abril de 2020;23(2):211-33.

10. Chulvi-Medrano I, Picón-Martínez M, Cortell-Tormo JM, Tortosa-Martínez J, Alonso-Aubin DA, Alakhdar Y. Different Time Course of Recovery in Achilles Tendon Thickness After Low-Load Resistance Training With and Without Blood Flow Restriction. *Journal of Sport Rehabilitation*. 1 de febrero de 2021;30(2):300-5.
11. Hildebrandt C, Raschner C, Ammer K. An Overview of Recent Application of Medical Infrared Thermography in Sports Medicine in Austria. *Sensors*. 7 de mayo de 2010;10(5):4700-15.
12. Park JC, Kim YN. Effects of Knee Extension Exercise Using Blood Flow Restriction on the Thickness and Balance Ability of Tendons. *J Kor Phys Ther*. 30 de abril de 2018;30(2):41-6.
13. Katayama K, Saito M. Muscle sympathetic nerve activity during exercise. *J Physiol Sci*. julio de 2019;69(4):589-98.
14. Rio E, Kidgell D, Moseley GL, Gaida J, Docking S, Purdam C, et al. Tendon neuroplastic training: changing the way we think about tendon rehabilitation: a narrative review. *Br J Sports Med*. febrero de 2016;50(4):209-15.
15. Bechan Vergara I, Puig-Diví A, Amestoy Alonso B, Milà-Villaruel R. Effects of low-load blood flow restriction training in healthy adult tendons: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Bodywork and Movement Therapies*. julio de 2024;39:13-23.
16. Hansen OB, Papson A, Eble SK, Drakos MC. Effect of Blood Flow Restriction Therapy Following Achilles Rupture and Repair: A Randomized Controlled Trial. *Foot & Ankle Orthopaedics*. enero de 2022;7(1):2473011421S00032.
17. Zusmanovich M, Campbell A, Youssefzadeh K, Tyler Haselman W, Milligan H, Limpisvasti O, et al. Blood Flow Restriction Therapy Following Achilles Tendon Repair in Male Patients. *Arch Phys Health Sport Med*. 2021;4(2):19-25.
18. Picón-Martínez M, Chulvi-Medrano I, Cortell-Tormo J, Alonso-Aubin D, Alakhdar Y, Laurentino G. Acute Effects of Resistance Training with Blood Flow Restriction on Achilles Tendon Thickness. *Journal of Human Kinetics*. 31 de marzo de 2021;78:101-9.
19. Slade SC, Dionne CE, Underwood M, Buchbinder R, Beck B, Bennell K, et al. Consensus on Exercise Reporting Template (CERT): Modified Delphi Study. *Physical Therapy*. 1 de octubre de 2016;96(10):1514-24.
20. Chan AW, Tetzlaff JM, Altman DG, Laupacis A, Gøtzsche PC, Krleža-Jerić K, et al. SPIRIT 2013 Statement: Defining Standard Protocol Items for Clinical Trials. *Ann Intern Med*. 5 de febrero de 2013;158(3):200-7.

21. Vopat BG, Vopat LM, Bechtold MM, Hodge KA. Blood Flow Restriction Therapy: Where We Are and Where We Are Going. *J Am Acad Orthop Surg*. 15 de junio de 2020;28(12):e493-500.
22. Schoenfeld BJ, Weakley J, Ljungberg J, Halson SL, Phillips SM. Physiological Responses and Adaptations to Lower Load Resistance Training: Implications for Health and Performance. *Sports Med - Open*. 12 de mayo de 2023;9(1):28.

**EFFECTOS DEL ENTRENAMIENTO CON RESTRICCIÓN  
DEL FLUJO SANGUÍNEO SOBRE EL TENDÓN DE  
AQUILES: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA**

**TRABAJO FINAL DE GRADO PRESENTADO POR:**

Louis DELAHAYE, Salomé POTIER

**TUTOR/A DEL TRABAJO:**

Patricio ALBA QUESADA

**FACULTAD DE FISIOTERAPIA  
UNIVERSIDAD EUROPEA DE VALENCIA**

**VALENCIA**

**CURSO 2024-2025**