

Tesis de Grado

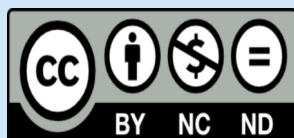
Rodrigo Daniel Pérez

Terapia de restricción de flujo sanguíneo en pacientes con reconstrucción de ligamento cruzado anterior

Instituto de Ciencias de la Salud

2025

*Carrera: Licenciatura en Kinesiología y
Fisiatría*



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons.
Atribución – No comercial – Sin obra derivada 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Documento descargado de RID - UNAJ Repositorio Institucional Digital de la Universidad
Nacional Arturo Jauretche

Cita recomendada:

Pérez, R. D. (2025). *Terapia de restricción de flujo sanguíneo en pacientes con reconstrucción de ligamento cruzado anterior* [Tesis de grado, Universidad Nacional Arturo Jauretche].

<https://rid.unaj.edu.ar/handle/123456789/3679>



TESINA
INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA SALUD
LICENCIATURA EN KINESIOLOGÍA Y
FISIATRÍA

Título:

*“Terapia de restricción de flujo sanguíneo en pacientes con reconstrucción
de ligamento cruzado anterior”*

AUTOR

Rodrigo Daniel Pérez

Legajo n°7252

Director:

Dr. Romano Osvaldo

Lic. Leymarie Sebastián

Fecha de Presentación: 4/9/2025

ÍNDICE

I INTRODUCCIÓN	2
II PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	4
III OBJETIVOS.....	6
Objetivo general	6
Objetivos específicos	6
IV MARCO TEÓRICO	7
IV. 1. LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR – ANATOMÍA Y BIOMECÁNICA.....	7
IV. 2. LESIÓN DE LCA. EPIDEMIOLOGÍA	9
IV. 3. LESIÓN DEL LCA E HIPOTROFIA MUSCULAR	11
V ESTRATEGIA METODOLÓGICA	13
VI CONTEXTO DE ANÁLISIS.....	15
VII RESULTADOS.....	16
VII. 1. BFRT – BLOOD FLOW RESTRICTION THERAPY – TERAPIA CON RESTRICCIÓN DE FLUJO SANGUÍNEO	16
VII. 2. APLICACIÓN DE BFRT	18
VII. 3. MECANISMOS FISIOLÓGICOS PARA LA HIPERTROFIA.....	20
VII. 4. PRESIÓN OCLUSIVA	25
VII. 5. EFECTOS SISTÉMICOS DE BFRT.....	26
VII. 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN PRÁCTICA DE BFRT	28
VIII CONCLUSIONES.....	38
IX BIBLIOGRAFÍA.....	40

I INTRODUCCIÓN

Lograr un aumento del trofismo y de la fuerza muscular luego de una lesión músculo esquelética o ligamentosa es un imperativo de la rehabilitación kinésica.

Generalmente, aquellas personas que se encuentran en una etapa aguda de lesión o en etapa posquirúrgica temprana, tienen dificultades para trabajar con las cargas necesarias que permiten producir una hipertrofia debido al dolor que tal esfuerzo significa.

La hipotrofia del muslo luego de una reconstrucción de ligamento cruzado anterior (LCA) no es la excepción a la regla, y se ha convertido en un desafío importante para los terapeutas físicos.

Medidas preventivas para la pérdida de masa muscular en fases aguda de reconstrucción ligamentaria donde no es posible aplicar cargas altas, como la estimulación eléctrica neuromuscular (EENM), carecen de suficiente consenso académico como para considerarlo una opción exitosa. Por lo tanto, parece necesario incursionar en nuevas estrategias de rehabilitación que permitan potenciar la fuerza y el trofismo en la primera etapa después de una lesión o una cirugía.

Con esa actualidad, el entrenamiento oclusivo interviene en el escenario clínico como una opción de tratamiento viable que se centra en el desarrollo de la fuerza e hipertrofia y que es de baja intensidad por naturaleza.

La terapia de restricción del flujo sanguíneo o BFRT, (Blood Flow Restriction Training) debido a su sigla en inglés, fue desarrollada originalmente en Japón a fines de la década de 1.970, donde recibió el nombre de entrenamiento KAATSU (1).

Es un método de entrenamiento innovador para el desarrollo de la fuerza muscular y la hipertrofia en escenarios deportivos y clínicos donde a través de la combinación de oclusión venosa y entrenamiento de resistencia de baja carga, se induce el desarrollo muscular a través de una serie de mecanismos celulares (1).

Por definición, esta terapia consiste en la aplicación de presión externa sobre la porción proximal de la extremidad a tratar con un dispositivo específico de compresión, como un manguito neumático o un vendaje elástico mientras en simultáneo se aplican cargas externas (ejercicio) de baja intensidad, con el fin de potenciar el crecimiento muscular (2).

El mecanismo propuesto se basa en la combinación de tres factores primarios: estrés metabólico, mecánico e hinchazón celular. Estos hechos actúan sinérgicamente para desencadenar una serie de respuestas secundarias que incluyen hipoxia tisular, acumulación de metabolitos, y tumefacción celular, las cuales promueven las vías de señalización autócrinas y parácrinas que conducen a la síntesis de proteínas, (fibra muscular tipo II) de hormonas anabólicas (locales y sistémicas) y a la estimulación de células madre miogénicas (1), facilitando así el desarrollo muscular.

En la última década se han publicado varios estudios que informan cambios hipertróficos en el músculo esquelético después de un entrenamiento de resistencia de baja carga con flujo sanguíneo restringido. Estas investigaciones han demostrado óptimos resultados utilizando diversos protocolos que han obtenido datos de reducción de la atrofia del cuádriceps después de la cirugía del LCA en un 50%, después de la etapa de inmovilización y reducción de carga.

.

II PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La pérdida de fuerza y la hipotrofia muscular son alteraciones comunes que se abordan en la medicina deportiva después de una lesión o cirugía músculo-esquelética. Un ejemplo ocurre después de la reconstrucción del LCA, donde los déficits en la fuerza del cuádriceps aumentan considerablemente debido a la inactividad, e incluso pueden persistir durante años a pesar de la rehabilitación (3).

La rotura de LCA es la lesión ligamentaria de la rodilla con necesidad de intervención quirúrgica más frecuente, con un número de 175.000 intervenciones anuales en Estados Unidos. Las secuelas típicas de esta lesión y su tratamiento quirúrgico incluyen déficits persistentes de la fuerza del cuádriceps, alteración de los patrones de movimiento, disminución del rendimiento funcional, aumento del riesgo de volver a lesionarse y adelgazamiento del cartílago articular femoral (4).

Las medidas del tamaño del cuádriceps, recogidas a partir de estudios de imágenes, ayudan a ilustrar el papel de la hipotrofia muscular como un factor subyacente que contribuye a la debilidad del mismo y a los déficits funcionales después de una lesión del LCA. Evaluaciones basadas en imágenes demuestran una asociación entre el área transversal (CSA) del cuádriceps y su debilidad 6 meses después de la operación. El CSA del cuádriceps representa el 38% de la variación en la fuerza posoperatoria de este músculo. La naturaleza modificable del tamaño del cuádriceps con rehabilitación estructurada sugiere que comprender completamente esta relación es de suma importancia clínica para lograr una óptima rehabilitación (4).

Las consecuencias de la pérdida progresiva de la fuerza muscular relacionada con lesiones pueden modificar rotundamente la vida de un paciente. El entrenamiento para el desarrollo de la fuerza es indispensable en la rehabilitación clínica de las lesiones músculo-esqueléticas. Una mayor fuerza del cuádriceps se ha relacionado con un menor riesgo de osteoartritis (OA) sintomática de rodilla y una reducción del estrechamiento del espacio articular, así como una disminución del dolor y cambios positivos en la función física. El entrenamiento de la fuerza posterior a la inmovilización y el reposo es esencial para recuperar el torque perdido como resultado de la hipotrofia por desuso (5).

Los esfuerzos para aminorar la debilidad deben comenzar lo más temprano posible en el proceso de rehabilitación. El desarrollo tanto de la fuerza como de la hipertrofia depende de la carga de tracción progresiva del músculo, generalmente modificada en la clínica mediante la cantidad de peso levantado (carga externa) y el número de series y repeticiones realizadas. Las pautas de entrenamiento para mejorar la fuerza recomiendan el uso de cargas de hasta un 60 % de una repetición máxima [1-RM]) con series de 8 a 12 repeticiones (3).

Sin embargo, entrenar a esta intensidad en el corto plazo después de una lesión o cirugía puede generar un estrés elevado en los tejidos que se encuentran en proceso de curación (ej., cartílago, ligamento, tendón, músculo). Mientras que el uso de cargas baja con repeticiones hasta el fallo puede minimizar el estrés excesivo sobre los tejidos en reparación tiene menos capacidad para aumentar la fuerza que el entrenamiento con cargas pesadas (3). Este escenario dificulta la posibilidad de programar un plan de rehabilitación que posibilite aplicar cargas óptimas que generen las adaptaciones musculares correspondientes.

Frente a esta problemática resulta importante abordar y conocer nuevas estrategias clínicas que mejoren la intervención temprana en la estimulación del trofismo en pacientes que han estado bajo un proceso quirúrgico, con el objetivo de mejorar también la transición de ejercicios de menor carga en las primeras etapas de la rehabilitación de lesiones a ejercicios de mayor esfuerzo y complejidad y así lograr un retorno óptimo a la práctica deportiva o actividad cotidiana del paciente.

Esta tesina proporcionará una revisión basada en evidencia sobre los beneficios del entrenamiento de fuerza e hipertrofia del muslo en pacientes con reconstrucción de LCA a través de la utilización de BFRT.

III OBJETIVOS

Objetivo general

- Realizar una revisión bibliográfica sobre el efecto de la terapia de restricción del flujo sanguíneo en pacientes con reconstrucción del LCA.

Objetivos específicos

- Describir los procesos fisiológicos que se generan a partir de la aplicación de la terapia oclusiva.
- Describir los protocolos utilizadas de la terapia oclusiva.
- Valorar los resultados y efectos de la aplicación de esta técnica.
- Valorar resultados de aplicación de esta técnica en pacientes con reconstrucción de LCA.

IV MARCO TEÓRICO

IV. 1. LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR – ANATOMÍA Y BIOMECÁNICA

El LCA tiene su raíz u origen en la meseta tibial, porción superior de la tibia, localizándose específicamente entre las eminencias intercondíleas.

Desde esta ubicación se proyecta hacia arriba y hacia atrás para insertarse en la porción pósteromedial del cóndilo femoral lateral (6).

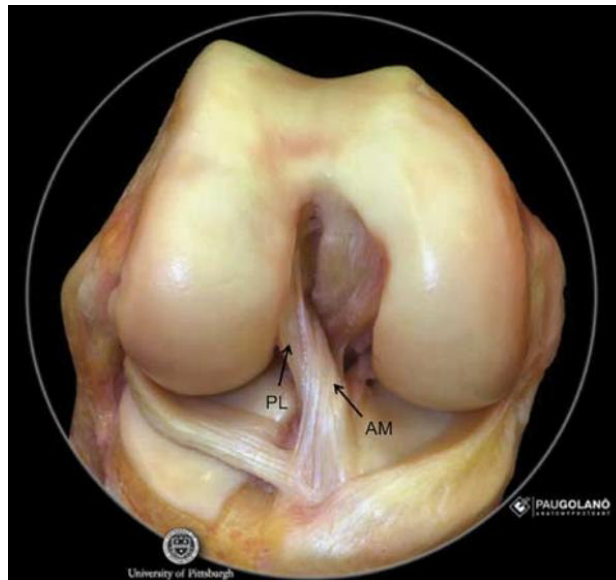


Fig. 1-Vista anterior de los ligamentos cruzados de una rodilla derecha. Haz antero medial (AM)- Haz pósteromedial (PL). Imagen extraída de “Knee ligament anatomy and biomechanics” (6)

Existe cierta discrepancia con respecto a la cantidad de haces que conforman al cruzado anterior, pero según la bibliografía(6) hay consenso en decir que lo componen dos, el antero-medial y el pósteromedial, cuyos nombres se dan debido a sus ubicaciones anatómicas.

Su longitud puede variar entre 31 y 38 mm y de 10 a 12 mm su espesor.(6)

El LCA se describe como un ligamento intra-articular aunque cuenta con una membrana sinovial propia, a través de la cual recibe un leve porcentaje de irrigación. La principal parte del flujo es suministrada a través de la arteria genicular media.

Su inervación corresponde al nervio tibial, el cual le proporciona mecano receptores que coadyuvan con la función propioceptiva del LCA.

Desde una perspectiva biomecánica, la rodilla cumple la doble función de permitir el movimiento entre las piezas que la componen y por otro lado soportar las cargas generadas por los desplazamientos y por las fuerzas externas.

Esta articulación tiene como principal movimiento la flexo-extensión, la cual ocurre en un plano sagital a través de un eje horizontal con un rango de amplitud promedio de 0° a 135° de flexión.

Los ligamentos cruzados desempeñan un papel fundamental en limitar el exceso de movimiento antero-posterior que genera la tibia sobre el fémur y viceversa. La tensión va a variar respecto el uno del otro según los distintos grados de flexión o extensión que exista. Esta relación de tipo dinámica se denomina “sistema de interacción cruzado de 4 barras” y es el que le brinda a la rodilla la estabilidad necesaria para afrontar demandas de la vida cotidiana y deportiva. Por ej. durante la extensión completa el LCA se encuentra bajo tensión y el ligamento cruzado posterior (LCP) laxo, mientras que al producirse una flexión sucede lo contrario.(6)

El LCA en cuestión tendrá como función principal evitar la traslación anterior de la tibia contrarrestando la fuerza ejercida por el cuádriceps, y a su vez actuará como estabilizador en la rotación interna de rodilla y en el valgo.

Durante el ciclo de marcha, las cargas mecánicas aplicadas pueden producir una fuerza articular reactiva que llega de 2 a 5 veces el peso corporal de un individuo, este valor puede aumentar 4 o 5 veces más según la demanda que exija el movimiento (correr-saltar-desacelerar). La musculatura aledaña a la rodilla y las partes blandas que la conforman, como cápsula y meniscos funcionan en conjunto con los ligamentos para lograr una correcta absorción de fuerzas y otorgar estabilidad al gesto motor. Al existir una lesión en dichas estructuras, como lo es una rotura de LCA, el equilibrio de fuerzas se ve alterado y la capacidad de la articulación de tolerar se compromete, conduciendo a otro tipo de lesiones o daños. (6)

IV. 2. LESIÓN DE LCA. EPIDEMIOLOGÍA

Los registros epidemiológicos sobre lesiones son una fuente muy importante para obtener información acerca de los factores de riesgo y los mecanismos que la producen.

Si bien la bibliografía ha sabido explicar la biomecánica de la rotura del LCA, la recolección de datos para desarrollar otros sesgos de la lesión parece ser algo limitada. La mayoría de la información disponible apunta a una población deportista, más aún centralizada en el fútbol, dejando de lado otro tipo de actividades así como también a la población no deportista; además los estudios están reducidos a una poca cantidad de países.

Existen registros por ejemplo en países como Luxemburgo, Reino Unido, Nueva Zelanda y Estados Unidos, que si bien proporcionan datos relevantes sobre prevalencia, epidemiología básica, métodos de diagnóstico y cuestiones quirúrgicas, no brindan ningún tipo de dato longitudinal prospectivo sobre lesiones de LCA, lo que evidenciaba una gran ausencia de conocimiento en el campo científico (7).

En base a ello, en Alemania, se diseñó a nivel futbolístico el Registro Nacional del LCA. El objetivo fue elaborar un registro prospectivo y longitudinal de lesiones del cruzado anterior para analizar datos específicos sobre cuestiones como incidencia, mecanismos de lesión y factores de riesgo en diferentes niveles de juego. La recolección de datos comenzó en la temporada 2014 - 2015 y se extendió por 5 años.

En este estudio fueron incluidos los equipos de fútbol (profesionales, semi-profesionales y amateurs) de la Federación Bonara masculina.

La incidencia del análisis se calculó por 1000 h de exposición y los mecanismos de lesión se clasificaron en directo, indirecto y sin contacto.

En los resultados se hallaron 958 lesiones de LCA, en una población compuesta por 46.482 jugadores. Del total de lesiones, el 50,4 % (483) sucedió en la liga amateur, el 20,7 % en la liga profesional (198) y el 28,9 % (277) en la semi-profesional.(7)

Los datos epidemiológicos de mayor relevancia ubicaron la tasa más alta de incidencia en la liga amateur. Los factores de riesgo más importantes fueron una lesión de LCA

previa (23,3%), otras lesiones previas en la rodilla (19,3%) y la ausencia de competencia por más de 4 semanas.(7)

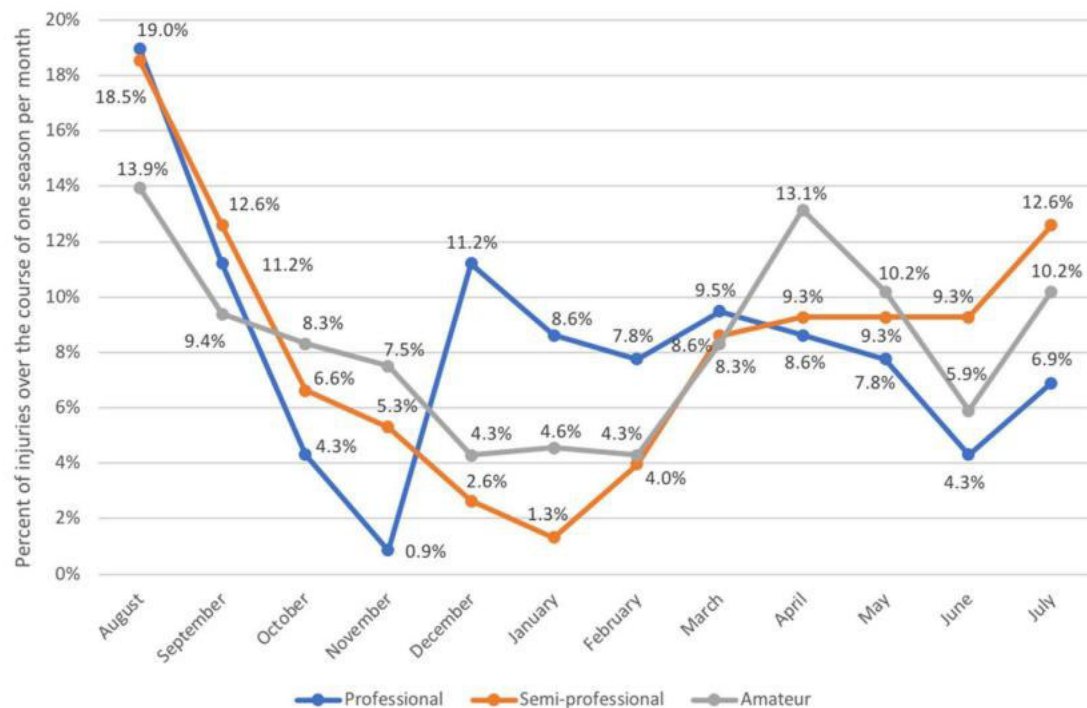


Fig.2 - Proporción de lesiones del LCA por cada mes en el transcurso de una temporada (en porcentaje). Imagen extraída de “Higher risk of ACL ruptura in amateur football compared to professional football: 5-year results of the ‘Anterior cruciate ligament-registry in German football’”. (7)

Otro dato relevante del estudio fue que se registró un porcentaje cada vez mayor de lesiones sin contacto en las ligas amateurs. En cambio en las ligas profesionales las lesiones se observaron por contacto directo. Este hecho, explica el estudio, se debe a los déficits físicos y neuromusculares que tienen los jugadores de las ligas inferiores.

Estados Unidos es otro punto de análisis, donde registran más de 120.000 lesiones del LCA por año, principalmente durante los años de escuela secundaria y universidad.

Una revisión sistemática cuyo objetivo fue investigar el riesgo anual de desgarros del LCA en atletas de secundaria, arrojó una incidencia general en mujeres de 0,081 lesiones por cada 1000 hs. de exposición en todos los deportes combinados. Los deportes de mayor riesgo para las mujeres fueron el fútbol y el baloncesto con un riesgo de lesión de LCA del 1,1 % y el 0,9 % por temporada respectivamente. En los atletas masculinos, la incidencia general de lesión fue de 0,05 por 1.000 hs de exposición. Los deportes de mayor riesgo fueron el fútbol y el lacrosse (deporte de conjunto y oposición que se practica con un stick o palo que posee una red para transportar una pelota) con un

0,8 % y un 0,4 % de riesgo de sufrir una lesión del LCA por temporada. Las atletas tuvieron una tasa general más alta de lesiones por exposición que los atletas masculinos. Según este análisis, el contexto de un atleta multideportivo a través de un período de cuatro años, el riesgo de sufrir un desgarro del LCA puede alcanzar del 5 % al 10 %.

(8).

Al considerar a los pacientes que han tenido reconstrucciones previas del LCA, los estudios han proporcionado dos hallazgos importantes (8). El primero es que en los primeros dos años de la cirugía, existe riesgo de lesionar el LCA contralateral. El segundo hallazgo es que existe un riesgo significativamente mayor de volver a lesionarse la rodilla operada.

Regresar a un alto nivel de actividad después de una reconstrucción del LCA es un fuerte factor de riesgo para volver a desgarrar el injerto (8).

Estos factores de riesgo, sobre la lesión previa de LCA, coinciden con los obtenidos en Alemania.

IV. 3. LESIÓN DEL LCA E HIPOTROFIA MUSCULAR

La hipotrofia muscular es una consecuencia que puede observarse en mayor o menor medida cuando se realiza una cirugía de rodilla, generalmente debido a la necesidad de un período de descarga articular y además carga de peso limitado; el proceso de reparación del cruzado anterior no es la excepción. Las lesiones del LCA se encuentran entre las más comunes de las extremidades inferiores en los deportes y a menudo requieren reconstrucción quirúrgica

Aproximadamente, solo en Estados Unidos, se realizan 100.000 reconstrucciones del LCA por año (9). La pérdida de masa muscular se inicia de manera muy acelerada luego de una lesión ligamentaria de este tipo, la misma suele potenciarse durante el periodo inicial de rehabilitación posterior a la cirugía, donde el movimiento y la producción de fuerza de la pierna se ven condicionados por el estado de la rodilla. Registros bibliográficos indican que incluso en personas sanas, la inmovilización de un miembro genera importantes pérdidas de masa muscular con tan solo 5 días de inactividad. (9)

En pacientes recién operados se postula que el pico de pérdida de masa muscular (sobre todo el aparato extensor de la rodilla) ocurre durante las primeras 2 semanas de inmovilización. Durante esta fase es muy importante no aplicar cargas de ningún tipo en la rodilla ya que es un periodo crítico para la protección del injerto. Si la articulación no se inmoviliza de manera adecuada, la curación del ligamento puede verse afectada (9). Esta necesidad de aliviar carga y potenciar la inmovilidad en pos del cuidado post quirúrgico sin duda va a afectar negativamente al aparato musculo esquelético que opera sobre la rodilla.

Este contexto trae aparejado a futuro déficits y complicaciones para ejecutar algunas tareas, sobre todo aquellas que van a demandar mayor grado de fuerza y coordinación, ocasionando problemas para regresar de manera segura a la práctica de actividades cotidianas o deportivas.

Las discrepancias en la fuerza de los extensores de la rodilla pueden llegar al 30 % en el lado quirúrgico en relación con la extremidad contralateral, incluso seis meses después de la cirugía existiendo diferencias del CSA del cuádriceps entre ambos miembros de hasta un 18 % hasta 6 años después (10).

Esta disfunción tiene la capacidad de generar posibles patrones anormales de movimiento, afectando la vida cotidiana y aumentando el riesgo de volver a sufrir una lesión. Por ejemplo, se ha documentado en la práctica deportiva alteraciones en la ejecución de aterrizajes verticales o técnicas alteradas de salto (10).

Otros autores registran que aproximadamente el 30 % de los pacientes puede tener déficits de fuerza del incluso hasta 12 meses después y que puede persistir durante años incluso después de la operación (11). Estos déficits se asocian a limitaciones en el rendimiento funcional, regreso al deporte y aumenta la posibilidad de una nueva lesión del LCA.

Teniendo en cuenta la estrecha relación causa consecuencia que existe entre la lesión de LCA y la pérdida de fuerza que ocasiona a futuro, resulta imperativo la aplicación de nuevas estrategias para amortizar los déficits que aparecen en el aparato locomotor.

V ESTRATEGIA METODOLÓGICA

El presente estudio consiste en un informe de investigación, un documento escrito que presenta los resultados de un trabajo investigativo sobre la terapia oclusiva basándose en investigaciones realizadas en los últimos diez años. La búsqueda bibliográfica tuvo lugar en una única base de datos, PubMed, a partir de la cual se realizaron los análisis correspondientes para la producción de este trabajo.

Para la búsqueda bibliográfica en la base de datos se utilizaron los siguientes términos:

	TERMINO LIBRE	MeSH
#1	ENTRENAMIENTO OCLUSIVO	BFR TRAINNING
#2	REHABILITACIÓN LCA	ACL REHABILITATION
#3	LIGAMENTO CRUZADO ANTERIOR	ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT
#4	EFFECTOS SISTÉMICOS	SYSTEMIC EFFECTS
#5	PRESION DE MANGUITO	CUFF PRESSURE HYPOTENSION
#6	HIPERTROFIA	HYPERTROPHY

Tales términos fueron combinados de la siguiente manera:

COMBINACIONES DE TERMINOS	NUMERO DE ARTICULOS ENCONTRADOS
#1 y #2	7
#1 y #4	4
#1 y #3	4
#1 y #5	14
#1 y #6	22

Para llevar a cabo la investigación se realizó una base de datos utilizando el programa Excel de Microsoft Office, donde se registraron los diferentes datos obtenidos en la búsqueda consideradas pertinentes a fines de dar respuesta a los objetivos propuestos.

Con respecto a los parámetros de elección de investigaciones, se incluyeron aquellos estudios que desarrollaban programas de entrenamiento con restricción del flujo aplicados durante la rehabilitación del LCA, independientemente de la modalidad; estudios que incluyan sujetos humanos con reconstrucción de LCA (postoperatorio); estudios que desarrollen sobre la hipertrofia muscular a partir de la restricción de flujo sanguíneo.

Por otro lado se excluyeron estudios que utilizan BFR solo para prevención en población sana, o que emplean distintas técnicas sin restricción de flujo; series de casos con menos de 10 participantes; informes de caso único, opiniones de expertos o revisiones narrativas y estudios que no reporten resultados clínicos o reproducibles

VI CONTEXTO DE ANÁLISIS

La lesión de LCA posee una tasa de incidencia notoria, y sus consecuencias luego de la cirugía demandan la continua búsqueda de estrategias que nos brinden mejores resultados a la hora de abordar el tratamiento.

Investigar sobre la terapia de restricción de flujo ofrece una amplia gama de beneficios y puede llevar a avances significativos principalmente en el ámbito de la rehabilitación así como también en el ejercicio físico y el rendimiento deportivo.

Poner en conocimiento los trasfondos de esta técnica permite maximizar su rendimiento y reducir su riesgo para un tratamiento más eficaz.

Para eso se tomaron investigaciones en base de datos ya mencionadas, se seleccionaron aquellos documentos que permitieron ampliar conceptos sobre sus mecanismos fisiológicos de acción, los efectos sistémicos que puede desencadenar en el cuerpo, riesgos sobre su utilización y se filtraron aquellas investigaciones que realizaron pruebas de aplicación práctica de BFRT.

Esas investigaciones serán comparadas y analizadas con el fin de clarificar los resultados para un posterior análisis.

VII RESULTADOS

Para la investigación realizada respecto de los efectos sistémicos, procesos y fisiológicos se seleccionaron metanálisis y revisiones sistemáticas de los últimos 10 años. Se descartaron algunos estudios repetidos.

Con respecto al análisis de la aplicación práctica de BFR se tomaron en cuenta ensayos clínicos y ensayos controlados aleatorios. De las 13 investigaciones abordadas, siete tenían como población objetivo pacientes con reconstrucción de LCA mientras que las restantes incluyen investigaciones sobre cómo impacta el BFRT en el trofismo muscular de poblaciones sanas.

VII. 1. BFRT – BLOOD FLOW RESTRICTION THERAPY – TERAPIA CON RESTRICCIÓN DE FLUJO SANGUÍNEO

Los aumentos en la hipertrofia muscular y la fuerza con BFRT se encuentran documentados en las bases de datos hace ya unos años. En la última década, una serie de revisiones sistemáticas y metanálisis han comprobado que esta técnica logra aumentar la fuerza y la hipertrofia de manera eficaz tanto en adultos jóvenes y en adultos mayores sanos, así como en poblaciones con necesidad de intervención terapéutica.

La terapia moderna de restricción del flujo sanguíneo –BFRT- o entrenamiento oclusivo fue descubierto en 1966 por Yoshiaki Sato, quien lo llamó entrenamiento KAATSU (“presión agregada”). En los años posteriores a su descubrimiento, BFRT ha sido estudiado en cientos de artículos publicados y tiene como población objetivo, desde pacientes en rehabilitación por lesiones músculo-esqueléticas hasta atletas físicos que buscan maximizar el crecimiento muscular (12).

Esta técnica implica el uso de un manguito de compresión, generalmente de tipo neumático, enrollado alrededor de la porción proximal de la extremidad a estimular para reducir parcialmente el flujo arterial y restringir completamente el retorno venoso (Figs. 3 y 4). En consecuencia se altera el entorno muscular del miembro correspondiente debido a la acumulación de sangre. La reducción del riego sanguíneo va a generar una

caída en el suministro de oxígeno, desafiando así al metabolismo energético local y disminuyendo el tiempo necesario para alcanzar el fallo muscular durante el entrenamiento o la ejercitación en comparación con ejercicios similares sin restricción alguna (12).



Fig. 3- Aplicación de manguito neumático en MMSS y MMII. Imagen extraída de “Blood Flow Restriction Therapy: Where We Are and Where We Are Going”, Acad. Orthop Surg. 2020.

(1).



Fig. 4-BFR y ejercicios activos. Imagen extraída de “Blood Flow Restriction Therapy Preserves Lower Extremity Bone and Muscle Mass after ACL Reconstruction”, Sports Health. 2022. (13)

Debido a los cambios metabólicos en la extremidad producto de la presión externa generada por el manguito de compresión, el entrenamiento BFR se puede prescribir con cargas ligeras de hasta un 20 % de una repetición máxima (1RM) proporcionando así aumentos similares a los del entrenamiento de alta intensidad (>70 % 1RM), lo que lo convierte en una alternativa para los atletas físicos que buscan maximizar el crecimiento

muscular sin estrés articular adicional o pacientes en que buscan generar niveles elevados de fuerza pero su condición no les permite trabajar con cargas altas (12).

VII. 2. APLICACIÓN DE BFRT

A la hora de aplicar la terapia oclusiva, un parámetro fundamental es la prescripción adecuada del ejercicio, es decir, la dosificación que va a ser utilizada en la práctica con los pacientes para potenciar al máximo sus efectos fisiológicos. Dentro de los parámetros indicativos a la hora de ejercitar, se tiene en cuenta intensidad, volumen y frecuencia con la que se va a realizar la actividad. Ahora bien, aunque el número de investigaciones sobre BFRT y la cantidad de profesionales que lo incorporan a sus prácticas diarias sigue en aumento, la evidencia no demuestra un protocolo definitivo de aplicación en cuestiones de intensidad, tipo de manguitos o presión utilizada. Por ejemplo en la investigación realizada se hallaron diferentes metodologías, diferentes presiones y diferentes tipos de manguitos neumáticos para restringir el flujo.

Sin embargo parece existir un punto de inflexión en la metodología de trabajo donde gran cantidad de autores incluyen un alto volumen de ejercitación. Según la bibliografía esto tendría como objetivo acumular metabolitos, entre ellos el lactato, para incrementar la producción de la hormona de crecimiento sérica (GH) y estimular así la síntesis de colágeno para la reparación y recuperación de tejidos. El acrecentamiento de GH a su vez aumenta la producción de factor de crecimiento similar a la insulina (IGF-1), proteína que estimula el crecimiento muscular debido a sus potentes efectos anabólicos (14).

Cabe destacar que la aplicación de esta técnica no se limita solo al el ejercicio activo o trabajos de tipo excéntrico-concéntrico. Publicaciones describen hasta tres maneras diferentes de utilizarlo (15). BFRT puede ser aplicado tanto en el ejercicio de resistencia voluntario (BFR-RE), durante el ejercicio aeróbico (BFR-AE) y también de forma pasiva (P-BFR), es decir generar una restricción de flujo pero sin esfuerzo alguno.

En relación al BRF-RE la bibliografía coincide que trabajar con una estructura estándar de 75 repeticiones fraccionadas en 4 series de 30-15-15-15 con pausas de 30 a 60

segundos y una frecuencia de dos a tres veces por semana, a una intensidad del 20 % al 40 % de una repetición máxima (RM) genera óptimas adaptaciones musculares (15).

Algunos autores hablan también de completar de tres a cinco series al fallo concéntrico muscular. En entornos prácticos como la rehabilitación este volumen elevado quizás no sea necesario ya que las fuentes indicarían que aumentar más las repeticiones no provocaría cambio alguno en la relación dosis-respuesta. Por lo tanto la bibliografía sugiere utilizar un total de 75 repeticiones (15).

Los períodos de descanso entre series durante BFR-RE son generalmente cortos. De 30 a 60 s es lo que comúnmente aparece en la literatura para lograr la hipertrofia del musculo esquelético, y la restricción suele mantenerse durante la pausa aunque no siempre es el caso, por ejemplo, Yasuda y colaboradores (2013) demostraron una activación muscular similar con presión continua e intermitente durante los períodos de descanso (15).

En relación a la frecuencia semanal para lograr resultados con BFR-RE, se ha informado que estímulos de dos veces por semana son suficientes para alcanzar tales metas. Si bien también existen investigaciones que han implementado el entrenamiento oclusivo dos veces al día y que puede usarse para acelerar la recuperación en un entorno de rehabilitación clínica, los enfoques de alta frecuencia (uno o dos estímulos por día) se pueden utilizar durante períodos cortos de tiempo (1 a 3 semanas); sin embargo, en períodos de programación normal, lo ideal son 2 a 3 sesiones por semana (15).

En cuanto a la duración de los programas de BFR-RE, se ha observado hipertrofia muscular y adaptaciones de fuerza en períodos de tiempo cortos, como de 1 a 3 semanas pero la mayoría de los estudios han examinado la hipertrofia muscular y las adaptaciones de fuerza en períodos de tiempo superiores a tres semanas de duración.

Por otro lado se encuentra la combinación del entrenamiento oclusivo con el ejercicio aeróbico, que tiene lugar cuando aplicamos una restricción de flujo al realizar en paralelo una práctica como la marcha o el uso de bicicleta, evidenciando adaptaciones no solo del músculo esquelético sino también de tipo cardiovasculares en periodos de tres semanas.(15)

Lo interesante del BFR-AE es que ha logrado probar aumentos de fuerza e hipertrofia en un campo donde generalmente no suele hacerlo, cuando una persona busca ganar

niveles de fuerza el entrenamiento aeróbico no suele ser una respuesta. Sin embargo se ha demostrado que la potencia del músculo esquelético puede aumentar entre un 7 % y un 27 % y que la hipertrofia entre un 3 % y un 7 % con este tipo de entrenamiento. Además, esta modalidad de ejercicio también mejora la capacidad funcional en una variedad de tareas para la vida diaria, la salud y el bienestar (15).

Por otro lado produce mejoras significativas en la resistencia cardiorrespiratoria (VO₂ máximo). Estos cambios se han observado con entrenamiento de caminata y bicicleta a intensidades tan bajas como el 30 % de la reserva de frecuencia cardíaca, con duraciones de 10 a 15 minutos y una frecuencia de dos a tres veces semanales durante seis semanas. Una posible razón de esta mejora si bien no está del todo claro, podría ser el aumento de los niveles de concentración del factor de crecimiento endotelial vascular (VEGF), una proteína asociada con la formación de nuevos capilares y mejoras en el suministro de oxígeno al músculo esquelético en ejercicio (14).

La otra estrategia para aplicar la técnica de oclusión sanguínea consiste en generar de manera intermitente restricciones del flujo sanguíneo a la extremidad, pero sin realizar ejercicio o movimiento alguno (P-BFR). Hasta la actualidad, el P-BFR se ha implementado siguiendo un protocolo estándar desarrollado originalmente por Takarada (2000) que consiste en oclusiones continuas de 5 minutos seguidos de 3 minutos de reperfusión aplicados durante 3 a 4 series. Hasta ahora, los investigadores han implementado este técnica una o dos veces al día durante una duración de 1 a 8 semanas, pero parece ser un sendero en el cual todavía falta desarrollar mucha más investigación (15).

VII. 3. MECANISMOS FISIOLÓGICOS PARA LA HIPERTROFIA

Los mecanismos fisiológicos y químicos que subyacen a BFRT siguen siendo objeto de debate, aunque parece que en gran medida están regulados por procesos similares a los ejercicios de fuerza de flujo libre. La hipertrofia del músculo esquelético se produce cuando hay un balance positivo de proteínas, lo que crea un entorno propicio para el crecimiento muscular.

El aumento del trofismo muscular es un proceso que parece estar mediado por el complejo mecanicista de rapamicina 1 (mTORC1), que actúa como un punto clave en la vía de señalización anabólica intracelular. La estimulación adecuada del músculo esquelético mediante entrenamiento de resistencia (RT) provoca aumentos post-ejercicio en la expresión de mTORC1, lo que resulta en incrementos visibles en el tamaño muscular (12).

La teoría actual, comenta Rolnick, sugiere que los beneficios del RT de baja carga con BFRT se deben a dos mecanismos principales: la fatiga acelerada provocada por metabolitos y la inflamación celular. Ambos mecanismos pueden crear un entorno anabólico en el músculo, aumentando las respuestas de síntesis de proteínas musculares (en inglés, MPS) al ejercicio.

La fatiga acelerada inducida por metabolitos se refiere a los efectos observados cuando se aplica BFR durante el ejercicio en una extremidad. Al realizar contracciones musculares bajo estas condiciones se acumulan subproductos metabólicos como lactato, iones de hidrógeno (H⁺), ATP y fosfatos inorgánicos. Estos metabolitos no pueden ser eliminados eficazmente a través del sistema venoso debido al manguito restrictivo. Como resultado, interfieren con el mecanismo de excitación-contracción y provocan un reclutamiento anticipado de fibras musculares tipo 2 en comparación con el mismo ejercicio realizado con flujo sanguíneo libre. A medida que se acumula la fatiga debido al estrés metabólico, la velocidad de contracción muscular disminuye y la activación muscular aumenta, lo que finalmente estimula los procesos anabólicos.

La presencia de estos metabolitos no solo aumenta la velocidad de reclutamiento sino que también aumenta el flujo sanguíneo hacia el músculo en actividad para combatir la acumulación de fatiga debido a que los subproductos aumentan la estimulación de los grupos de fibras nerviosas aferentes III-IV. Se cree que estos aferentes pueden incluso, inducir el reclutamiento adicional de unidades motoras ayudando a mantener la fuerza durante las contracciones musculares. Las aferencias del grupo III-IV tienen sinapsis en el sistema nervioso central(SNC), jugando un papel importante aumentando la percepción subjetiva del esfuerzo durante el ejercicio. Esto es beneficioso para la hipertrofia ya que niveles más altos de esfuerzo durante las contracciones podrían correlacionarse con un mayor reclutamiento de fibras musculares tipo II (12).

Aún no está completamente claro si los metabolitos en sí contribuyen a una respuesta hipertrofica. La evidencia emergente sugiere que el lactato podría mediar procesos anabólicos, posiblemente al inhibir la actividad de la enzima histona desacetilasa, un regulador negativo del crecimiento muscular (12). Además, la acumulación de H⁺ podría facilitar una mayor hipertrofia de las fibras tipo I al alterar la unión del calcio en las fibras tipo II, lo que incrementa la carga sobre las fibras tipo I para mantener la producción de fuerza durante el ejercicio. Esto podría explicar por qué la BFR de baja carga tiende a inducir una hipertrofia preferencial en las fibras musculares de contracción lenta.

En relación a la hinchazón celular, se refiere al aumento temporal del grosor muscular causado por la acumulación de líquido en una extremidad debido a la restricción del retorno venoso. Este líquido se desplaza del plasma hacia las células musculares debido a diferencias en el gradiente de osmolaridad. Durante y después del ejercicio, la acumulación de líquido se atribuye a la disminución en la disponibilidad de oxígeno, la acumulación de metabolitos y los aumentos en la hiperemia reactiva. Estos factores están relacionados con un reclutamiento más temprano de fibras musculares tipo II.

El entrenamiento con BFR ha demostrado aumentar significativamente la inflamación celular en comparación con los controles, mientras que los niveles de inflamación durante el ejercicio hasta el fallo son similares a los del entrenamiento con altas cargas. Esto sugiere que el ejercicio con BFR puede provocar aumentos en la inflamación celular, que podrían contribuir a cambios significativos en el tamaño muscular a largo plazo (12).

La inflamación celular parece actuar estimulando un sensor de volumen intrínseco en la fibra muscular, que, al estirarse, inicia el proceso de MPS. Cuando el líquido queda atrapado en la extremidad durante y después del ejercicio, la matriz cito esquelética se estresa, lo que lleva a la activación de vías de señalización intracelular anabólicas (12).

Sin embargo, existen discrepancias en la literatura, según Rolnick(12), si la inflamación celular por si sola es suficiente para inducir efectos anabólicos. A razón de los datos que el recopiló, existen investigaciones recientes que evaluaron la inflamación celular pasiva sin ejercicio y no lograron aumentar la expresión de mTORC1; pero aplicaciones prolongadas de hinchazón celular pasiva han mostrado la capacidad de reducir o

prevenir la atrofia por desuso, lo que apoya la idea de que la hinchazón celular puede ofrecer un estímulo hipertrófico que ayuda a mantener el equilibrio proteico en el músculo durante un período prolongado.

Según Takarada(16), esta acumulación de metabolitos desencadena en otro factor que es de suma importancia para estimular la hipertrofia muscular. La presencia de algunas hormonas como la de crecimiento (GH), testosterona y IGF-1 se consideran importantes para que exista aumento de masa muscular, uno de los principales procesos implicados en la estimulación de las secreciones hipofisarias de GH y hormonas gonadotrópicas sería la acumulación intramuscular de subproductos metabólicos como el lactato (La). La elevada concentración de metabolitos y la acidificación asociada dentro de los músculos estimulan los quimiorreceptores que envían señales aferentes estimulando al sistema hipotalámico-hipofisario generando un aumento de producción en tales hormonas (16).

MECANISMO BFR

**ESTRÉS METABÓLICO
+ TENSIÓN MUSCULAR**

- Hipoxia
- Hinchazón celular
- Aumento de metabolitos



**SÍNTESIS PROTEÍCA ++
FIBRAS MUSCULARES TIPO II ++
HORMONAS SISTÉMICAS Y
LOCALES++**



**FUERZA MUSCULAR ++
HIPERTROFIA ++
ANGIOGÉNESIS ++**

*Diagrama de mecanismo de acción de BFR, extraído de “Blood Flow Restriction Therapy: Where We Are and Where We Are Going”, Acad Orthop Surg. 2020 (1).

VII. 4. PRESIÓN OCLUSIVA

El objetivo del manguito de restricción es proporcionar suficiente presión externa a la extremidad superior o inferior en su región más proximal para ocluir el flujo venoso mientras se mantiene el flujo arterial. En los comienzos del uso de esta técnica, las presiones del manguito eran comúnmente superior a 200 mmHg. Estas presiones tan elevadas garantizaban ocluir el flujo venoso pero sin duda también comprometían el arterial, sin embargo, en investigaciones más recientes se han demostrado resultados con presiones más bajas como 50 mm Hg, con menos riesgo de efectos adversos.

Ahora bien, existe en la actualidad una enorme inconsistencia respecto de las presiones individualizadas de los manguitos utilizadas en la literatura sobre BFRT, y un agravante parece ser la falta de justificación para su elección.

Establecer un valor único para conseguir la oclusión resulta complicado porque existen determinadas variables que van a condicionar la cantidad de presión necesaria. La presión óptima aplicada difiere con cada individuo y depende en gran medida de la circunferencia de la extremidad y el ancho del manguito. El propósito de utilizar presiones individualizadas del manguito es superar esta variabilidad.

Un metanálisis realizado por Clarkson(17), orientado a resolver esta problemática, recopiló 52 estudios, con una muestra aproximada de 1.133 pacientes y observó mucha discrepancia a la hora de elegir una presión determinada. Las presiones utilizadas en los trabajos se basaron en porcentajes de la presión de oclusión arterial, lo que denominamos POA (AOP por su sigla en inglés). La POA es la presión requerida para ocluir todo el flujo sanguíneo a la extremidad, para calcularla, se coloca un manguito de presión arterial en la extremidad proximal y se realiza una ecografía doppler en la arteria correspondiente, el manguito se insufla hasta que no se identifica el pulso y luego se suelta lentamente. El registro de la presión cuando el pulso regresa se define como POA. Dentro de los 52 trabajos incluidos en la investigación de Clarkson 16 utilizaron presiones variadas, 13 trabajaron al 80% de la POA, 7 el 60%, 5 el 50%, otros 4 al 40% y finalmente 3 al 30%(17). Además de esta gran variabilidad de presiones, en la mayoría de los estudios, explica el autor, no se justificó el motivo de la presión seleccionada y en otros casos se citó la presión utilizada en una investigación previa.

En la presente investigación, colisionamos con un evento similar, los estudios seleccionados para realizar el análisis reflejaron cierta inconsistencia en la elección de las presiones, observando distintos datos. Una de las presiones que más se vio repetida fue la intensidad del 80% de la POA, y en menor medida trabajos al 50%; incluso otros estudios trabajaron directamente con escalas de mm-Hg.

Por fuera del ámbito de BFR y entrando en el campo de la literatura quirúrgica, un autor (18) analizo cuales eran las presiones exactas que generaban la restricción del flujo hacia MMII en el campo de la cirugía. A través de un análisis en pacientes determinó que con una presión media del 151 mmHg se pueden usar de manera efectiva para generar la oclusión(18).

VII. 5. EFECTOS SISTÉMICOS DE BFRT

El enfoque principal del entrenamiento con restricción de flujo es causar adaptaciones beneficiosas al músculo esquelético local, pero hay información limitada reportada sobre los efectos del entrenamiento BFR en el resto del cuerpo. Múltiples sistemas pueden verse afectados por el este tipo de entrenamiento, pero aún no se definen de manera clara las consecuencias que podría ocasionar en el resto del cuerpo.

Para comprender mejor el BFR y su impacto general en el cuerpo humano, se han realizado múltiples investigaciones que buscan explicar y conocer qué efectos puede desencadenar la el entrenamiento con oclusión.

El ejercicio con BFR se asocia con niveles bajos de saturación de oxigenación del tejido del músculo esquelético (<10 %), lo que representa una hipoxia severa en el tejido de trabajo. La sobrecarga metabólica por la acumulación de hidrógeno y lactato, en combinación con la hipoxia, activa la IL-6, los macrófagos y los neutrófilos, lo que conduce a un entorno anabólico general sin el daño muscular mecánico que se produce con el entrenamiento de alta intensidad. Se ha observado también luego del tratamiento con BFR un aumento de la señalización y la proliferación de células madre miógenas locales en muestras de biopsia muscular post-terapia. También se ha constatado la movilización periférica de plaquetas y células madre hematopoyéticas después del ejercicio (19).

Por otro lado se ha demostrado que el BFR induce una respuesta angiogénica local mediante la regulación positiva del factor de crecimiento endotelial vascular (19).

El entrenamiento de fuerza de baja intensidad con restricción del flujo sanguíneo también se asocia con un leve incremento de las respuestas hemodinámicas, especialmente en la frecuencia cardíaca, y la hipotensión 15 minutos después del ejercicio (20).

Una preocupación que surge con el entrenamiento BFR es la posibilidad de un reflejo de presor de ejercicio (EPR) intensificado, un reflejo que contribuye a las modificaciones cardiovasculares durante el ejercicio desde el sistema nervioso autónomo. Se plantea la hipótesis de que la reducción del flujo sanguíneo a los músculos que trabajan podría provocar complicaciones cardiovasculares mediadas por EPR y provocar una elevación excesiva de la presión arterial. Aunque una EPR anormal podría ocurrir en personas aparentemente sanas, la vacilación aumenta en poblaciones en riesgo, como personas diagnosticadas con insuficiencia cardíaca, hipertensión o enfermedad arterial periférica (EAP). Estos individuos están predispuestos a un aumento exagerado de la actividad del sistema nervioso simpático durante el ejercicio. Sin embargo, según Vanwyke, el riesgo de un evento adverso se puede mitigar utilizando presiones relativas de inflado del manguito y reduciendo la presión BFR (14).

Existe hipotensión post-ejercicio después de la aplicación BFR de baja intensidad, debido a un fenómeno conocido como hipotensión post-ejercicio (PEH), que además reduce la precarga cardíaca durante el ejercicio (20).

En relación a la respuesta cardíaca, la mayoría de los estudios analizados encontraron una frecuencia mayor en comparación con los grupos de control que realizaron ejercicio aeróbico sin oclusión, pero dicho aumento estaría relacionado con la necesidad de una mayor demanda energética celular que con el proceso oclusivo en sí (21).

La frecuencia cardíaca (FC) aumenta significativamente sólo después de la primera serie de ejercicio. Sin embargo, las mediciones regresan a los valores iniciales después del ejercicio (20).

El BFR no genera cambios significativos en la saturación O₂ y el doble producto (DP) durante y a lo largo del tiempo post-ejercicio. El DP es el producto de la presión arterial

sistólica (PAS) y la frecuencia cardíaca y sirve como predictor válido del consumo de oxígeno del miocardio durante el ejercicio (20).

Tampoco existen diferencias significativas en las respuestas de FC entre los grupo de control de adultos mayores que realizaron entrenamiento de resistencia con o sin BFR. Entre estos grupos de control se halló un pequeño aumento en el volumen sistólico y gasto cardíaco, sin embargo no fueron cambios significativos en la actividad cardíaca (21).

El ejercicio aeróbico con restricción del flujo sanguíneo provoca también hipoalgesia local y sistémica y aumenta los niveles circulantes de opioides endocanabinoide (22).

La combinación de BFR con entrenamiento aeróbico de baja intensidad desencadena hipoalgesia local y sistémica. Esto se debe a que se activan los sistemas opioides y endocanabinoide, que están involucrados en la inhibición del dolor. Tanto la concentración de beta-endorfina circulante como la de 2-araquidonoilglicero, aumentaron después del ejercicio oclusivo (22)

Por último, un efecto secundario asociado con el entrenamiento BFR es el entumecimiento. Esto probablemente se deba a presiones del torniquete inapropiadamente altas, lo que resulta en la compresión del nervio periférico. La incidencia es baja (< 2 %) y los casos son de naturaleza transitoria. Una apropiada selección y aplicación del manguito (es decir, tamaño, sitio, presión) es esencial para prevenir dicha irritación (14).

VII. 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA APLICACIÓN PRÁCTICA DE BFRT

De las investigaciones abordadas para este análisis se observa que el protocolo más utilizado para trabajar con BFRT fue el 30-15-15-15, el cual parecería ser el más frecuente dentro de la literatura. También se hallaron publicaciones que utilizaron ejercicios isométricos y trabajos concéntricos de 20 repeticiones cuyos resultados también han sido favorables en el hecho de aumentar el CSA de la musculatura, lo que invita a pensar que quizás el hecho principal que permite la hipertrofia está más

relacionado con el la oclusión del riego sanguíneo y no con un número específico de repeticiones.

La modalidad de trabajo se vio mayormente orientada a lo que nombramos anteriormente como BFR-RE, donde el paciente realiza ejercicio activo mientras se le ocluye el riego sanguíneo a la extremidad determinada y en menor medida P-BFR, cuyo accionar por parte del paciente es totalmente pasivo.

Con respecto a la frecuencia semanal con la cual se aplica la terapia, las planificaciones de dos a tres estímulos arrojaron datos favorables para comenzar a ver cambios en la musculatura. No obstante, de las investigaciones tomadas se distinguen diferentes frecuencias ya que no todas intervinieron en la misma etapa de rehabilitación, ni lo abordaron de la misma manera. Por ejemplo hay registros de dos aplicaciones oclusivas diarias sin ejercicio activo.

La presión utilizada en las investigaciones fue tomada con los dos parámetros que se mencionan en la literatura, la individualizada, que se rige a partir de un porcentaje de la POA y la práctica, que utiliza un valor no específico por debajo de la POA.

La presión individualizada más utilizada fue al 80 % de la POA, dando resultados a favor del aumento del CSA del muslo. En el caso de la práctica, el valor de presión más utilizado representó una media de casi 180 mmHg.

En relación a la duración de los programas de terapia oclusiva, la bibliografía habla de programas cortos de alrededor de 3 semanas de duración, pero los trabajos de campo abarcan hasta 13 y 16 semanas en pacientes con reconstrucción de LCA. Por las características que tiene BFRT parecería no tener un punto de corte necesario, ya que estimular la fuerza y el trofismo es un objetivo presente en diferentes etapas de la rehabilitación de LCA. BFRT podría ser parte de todo el proceso variando su dosificación y su protagonismo.

De los estudios revisados siete aplicaron BFRT en pacientes que habían sufrido una reconstrucción ligamentaria de LCA [(13),(23)- (28)]. Xuefeng Li(24), Hughes(25) y Jack(13) se guiaron con el protocolo ya mencionado. Xuefeng Li trabajó con 3 grupos de pacientes, uno de control, uno con el que trabajo al 40% de la POA y otro al 80% de la POA. Entre sus hallazgos aparece que no solo hubo mejores resultados en cuanto

aumento de fuerza y CSA del muslo en los grupos experimentales, sino que además el grupo que trabajo con mayor presión oclusiva mejoró en un porcentaje mayor.

Kilgas (26) en cambio, utilizó un protocolo de ejercitación de 3 series de 30 repeticiones. Los participantes de su investigación a diferencia de otras, eran personas con reconstrucción de LCA con 2 años de evolución que poseían alguna asimetría con respecto al miembro sano en cuanto trofismo o fuerza. Al cabo de 28 días de trabajo, con una frecuencia semanal de 5 estímulos, halló mejoras significativas en cuanto a fuerza y volumen del muslo.

Hughes comparó un grupo experimental de 14 personas y otro control de la misma cantidad y entre sus principales hallazgos, se encontró con un aumento tanto de la fuerza extensora de la rodilla como del CSA de los músculos del muslo (5,8 %) en relación al grupo control, lo que también resultó en una mejora en las de mediciones de la función física; por otro lado observó una mayor reducción del dolor y del derrame en comparación con la terapia tradicional, factor que puede influir en la atenuación de la inhibición artrogénica (respuesta refleja del sistema nervioso central que se produce tras una lesión articular, reduciendo la activación de los músculos alrededor de la articulación afectada como medida de protección para evitar mayores daños) (25).

Por otro lado la investigación de Jack demostró que el grupo que utilizó BFRT(17 personas) logró conservar mucho mejor la masa muscular del muslo en las primeras etapas después de la cirugía (1-4 semanas) previniendo así la atrofia por desuso en relación al grupo control(15 personas). En la investigación de Ohta (27) el protocolo del grupo experimental (22 personas) utilizado fue de bloques isométricos de 5 minutos y trabajos de 20 repeticiones con los pacientes post quirúrgicos de LCA durante 16 semanas; y como resultado halló un aumento de la fuerza, del CSA y del diámetro de fibra muscular en relación al grupo experimental (22 personas).

Takarada (28), realizó su investigación apuntando a la primera etapa de rehabilitación (dos semanas). Durante este período trabajó con estímulos oclusivos continuos en MMII de duración de 5' pero sin realizar ningún tipo de ejercitación activa. Los resultados arrojaron que el grupo que trabajo con BFR pudo atenuar la hipotrofia por desuso de los músculos extensores de rodilla luego de una cirugía de LCA de manera mucho más efectiva que el grupo de control. El CSA de los extensores en el grupo control disminuyó un 20,7 % mientras que en el grupo experimental un 9,4 %. El tratamiento de

restricción también tuvo su efecto en el aparato flexor de la rodilla cuyo diámetro se redujo un 11,3 % en el grupo control y un 9,2 % en el experimental. En la siguiente figura extraída de su estudio se observa la comparación entre ambos grupos.

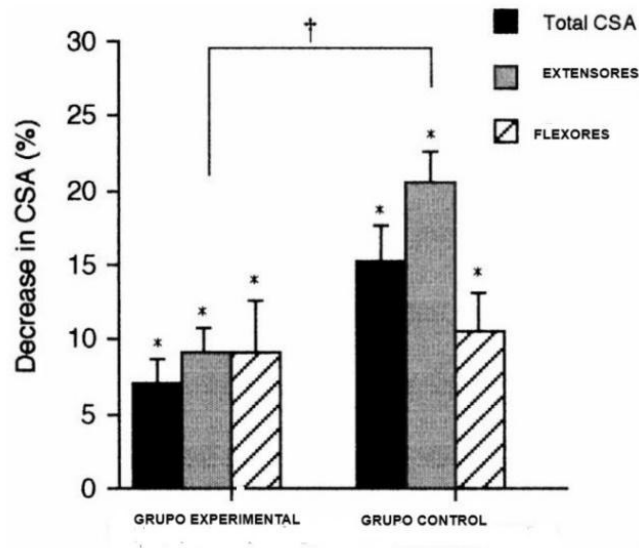


Fig. 5. Disminuciones relativas en el área de la sección transversal muscular durante el período comprendido entre el día 3 y 14 después de la operación. Imagen extraída de “Las aplicaciones de la oclusión vascular disminuyen la atrofia por desuso de los músculos extensores de la rodilla” de Yudai Takarada (28)

Iversen fue otro autor que realizó investigaciones en esta primera etapa de tratamiento y el único, del análisis, en encontrar resultados negativos en la aplicación de BFRT. En su estudio (23) trabajó con pacientes en el segundo día de la operación, realizando contracciones isométricas de cuádriceps, progresando hacia ejercicios concéntricos bajo una oclusión continua de 5' con un descanso de 3', dos veces al día. Los resultados mostraron que la hipotrofia muscular no se vio afectada por el protocolo, obteniendo así valores similares a los del grupo de control, siendo éste uno de los únicos estudios que demostraron resultados no favorables a la aplicación de BFR.

Tennent (29) centralizó su investigación en la recuperación de pacientes que atraviesan una artroscopia no reconstructiva de rodilla y como se ven beneficiados por el uso de entrenamiento oclusivo. Según su registro, numerosas artroscopias se realizan año tras año y si bien el proceso quirúrgico suele resolver la patología articular, la rehabilitación adecuada del miembro puede verse limitada por años.

El diseño del estudio fue un ensayo controlado aleatorio que comparó la kinesioterapia con BFR con un trabajo similar sin oclusión alguna. Se evaluó un total de 17 pacientes

que habían atravesado una artroscopia de rodilla con el método de 75 repeticiones. Los resultados arrojaron que luego de 12 sesiones se observaron cambios significativamente mayores en la circunferencia del muslo en aquellos pacientes que utilizaron el entrenamiento oclusivo en relación a los grupos de control.

Por otro lado, estudios en personas sanas han corroborado también la efectividad del entrenamiento con oclusión del flujo sanguíneo con respecto a la hipertrofia muscular y el aumento de fuerza, lo cual parece reforzar la capacidad del método para enfrentar los procesos que inducen la hipotrofia del músculo.

Entre esas investigaciones aparece la de Hansen y colaboradores, que evaluaron los cambios generados sobre la fuerza muscular, tamaño de las fibras, número de células satélite y número mionuclear luego del entrenamiento oclusivo combinado con entrenamientos de carga alta en comparación solo con entrenamiento de carga alta para determinar si la combinación de los métodos era tan efectiva como entrenar constantemente a intensidades elevadas. Dieciocho personas libres de lesiones, fueron divididos en dos grupos: BFR ALTA INTENSIDAD (BFR-HRT) y ALTA INTENSIDAD (HRT) llevando a cabo 4 sesiones semanales de entrenamiento de resistencia durante un periodo de 6 semanas; los resultados evidencian como hallazgo principal que la fuerza muscular máxima y el CSA de las fibras musculares tipo II aumentaron en un grado similar, lo que reafirma que el entrenamiento oclusivo genera adaptaciones similares al entrenamiento de alta intensidad. Separando por tipos de fibras, se observó una ganancia de 16 % en el CSA de las fibras tipo II tanto en el grupo experimental como en el de control respectivamente, la diferencia fue notoria en el CSA de fibras tipo I que aumentaron su grosor un 12 % después de HRT sola, mientras que permaneció estadísticamente igual con BFR-HRT, lo que sugiere que el crecimiento muscular con oclusión se da a partir del desarrollo de las fibras tipo II y que la respuesta de hipertrofia de las fibras tipo I puede requerir un volumen de entrenamiento de mayor volumen y más intensidad en comparación con las fibras tipo II. Finalmente, no se observaron cambios en el número de mionucleares después de la intervención en ninguno de los grupos a pesar de que el contenido de CSA aumentó en las miofibras tipo II en respuesta a la HRT sola (30).

Investigaciones también han demostrado que el entrenamiento oclusivo puede influir sobre el CSA de los tendones que participan durante el ejercicio. Centner (31) realizó un estudio cuyo propósito fue indagar sobre el patrón hipertrófico inducido en el tendón de

Aquiles con BFR, en comparación con la hipertrofia regional normalmente observada con el entrenamiento convencional de carga alta. Para ello reclutó 40 personas adultas sanas, a las cuales se les indicó un protocolo de entrenamiento que consistía en completar tres series de elevaciones de talón (flexión plantar) sentado y de pie con 1 minuto de pausa entre cada bloque de trabajo durante un periodo de 14 semanas. La carga de entrenamiento se fijó en un 20 % 1RM en las primeras cuatro semanas, la cual se aumentó progresivamente en un 5 % hasta alcanzar una carga final del 35 % de 1RM en las últimas dos y utilizando una presión del 50 % de la AOP.

El CSA del tendón de Aquiles se examinó mediante resonancia magnética axial observándose aumentos porcentuales del 5,2 %. Este cambio también fue acompañado de un incremento de la fuerza dinámica de los flexores plantares de $121,8 \pm 40,7$ kg a $174,9 \pm 34,8$ kg.

Colomer – Poveda (32) analizaron los efectos del entrenamiento de baja carga con y sin BFR y su relación respecto a la contracción voluntaria máxima (MVC), espesor muscular del sóleo y la excitabilidad neuronal como sucede al realizar entrenamiento de alta intensidad.. Luego de tres estímulos semanales durante un mes y utilizando ecografías y estudios electromiográficos para evaluar, los datos arrojados evidenciaron claramente que luego de 12 sesiones (cuatro semanas) de trabajo isométrico unilateral con oclusión sanguínea, fue tiempo suficiente para generar adaptaciones y lograr un aumento de la MVC y el grosor del soleo. Sin embargo, el estímulo no generó variación alguna en ninguno de los marcadores neuronales evaluados, lo que invita a pensar una falta de cambio en la excitabilidad neuronal. Un hallazgo destacable está vinculado con un registro de aumento de la fuerza en el miembro no entrenado. Este evento que ocasiona mejoras en el miembro no entrenado se conoce en la literatura como transferencia entre miembros o educación cruzada (32) y se considera una consecuencia de adaptaciones neuronales en el tracto cortico espinal que controla el miembro, por ende si bien la investigación no demostró su hipótesis aún no se descarta que el BFR en algunas de sus formas logre adaptaciones neuronales.

Shiromaru (33) también investigó los efectos del BFRT de baja intensidad en personas sanas. Evaluó a 18 pacientes, nueve de grupo experimental y nueve de control y les otorgó una planificación de cuatro estímulos semanales durante un período de tres

semanas con oclusión sanguínea. Entre los principales hallazgos se percibió un aumento de CSA en los cuatro músculos del cuádriceps sin aumento de edema o daño muscular.

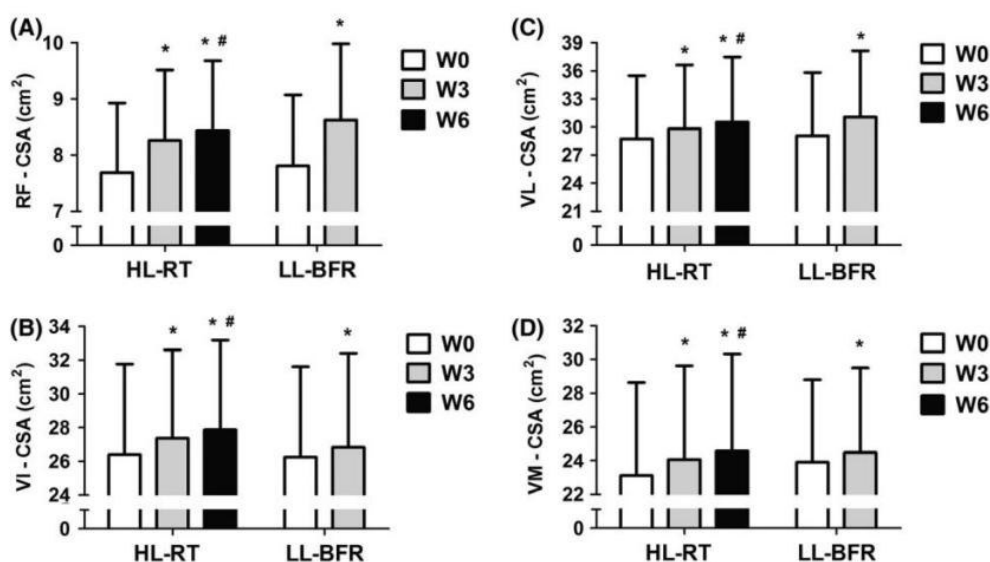


Fig. 6 (33) Área de sección transversal (CSA) del recto femoral (Panel A), vasto intermedio (Panel B), vasto lateral (Panel C) y vasto medial (Panel D) evaluados en la semana 0, semana 3 y semana 6 para HL-RT (alta intensidad) y LL- BFR (baja intensidad con oclusión).

Otro análisis que profundizó los efectos de la terapia oclusiva pero desde otra perspectiva fue el de Kubota (34). A diferencia de otras investigaciones, puso el foco en determinar los efectos de la restricción repetida del flujo sanguíneo sin ningún tipo de entrenamiento muscular. El estudio incluyó 15 personas sin antecedentes de lesiones deportivas, que fueron divididas en tres grupos: BFR, entrenamiento isométrico (IMT) y grupo control (CON). En este trabajo particularmente se indujo una hipotrofia muscular mediante la inmovilización de uno de los miembros inferiores utilizando un vendaje de tobillo y a la imposibilidad de cargar peso durante dos semanas. El grupo experimental (BFR) practicó el protocolo sugerido por Takarada (28) que consta de una oclusión continua de 200 mmHg durante 5 minutos con una pausa de 3, esta secuencia fue repetida 5 veces con una frecuencia diaria de dos aplicaciones (mañana y tarde) a lo largo de los 14 días que duró la investigación.

Por otro lado el grupo IMT realizó ejercicios isométricos del cuádriceps con una relación de 5 segundos de contracción con 5 segundos de pausa (20 repeticiones). El grupo CON no realizó terapia alguna.

El análisis consistió en medir la fuerza de los extensores de rodilla y el diámetro del muslo para evaluar el grado de hipotrofia. Los datos encontrados demuestran que la terapia de restricción amortizó enormemente la pérdida de masa muscular en relación al grupo que trabajo con ejercicios isométricos. Además los cambios porcentuales en el torque de la rodilla también fueron significativamente menores sugiriendo que la terapia oclusiva ayuda a prevenir el impacto de la atrofia y la pérdida de fuerza por desuso.

Tabla- BFRT y Resultados								
Autor	Dx	Presion oclusiva	Muestra	Método	Frecuencia	Duración	Resultados	Evaluacion
Ohta (27)	Post qx -LCA	180mmhg	44 pacientes G.Experimental=22 G.Control=22	1/2 Sentadilla Flexion de cadera/Abd de cadera Iso aductores c/pelota	2xDia-6xS 2 X Diax-6xS 2 X Dia-6xS	13 16 semanas	Aumento de fuerza en grupo control Csa G.Experimental=leve aumento/G. Control=similar Csa fibra- G.exp.=leve aumeto/ G.Control= similar	Máquina isocinética
Hughes(25)	Post qx -LCA	80% POA	28 pacientes Bfr rt=14 HL rt = 14	Subidas al cajon(25cm) Empuje de piernas unilateral	20 REPS/ 3XDia/6XSemana 2 X Semana 4 Series 30X15X15X5	8 Semanas	Aumento de trofismo y fuerza c/bfr	
A.Jack(13)	Post qx -LCA	80% POA	32 pacientes BFR =17 CONTROL N=15 / 7 H - 8 M	Iso cuadriceps en ext. Ext. de cuadriceps Prensa bilateral Prensa monopodal Curl de isquio monopodal Sentadilla Estocada Step up	4 series -30x15x15x15	2-3 S 3-4 S 4-5 S 6-12S 6-12S 5-12S 9- 10S 10-12S	Grupo control perdio mayor cantidad de masa muscular	
Takarada(28)	Post qx -LCA	180- 238mmHg	16 pacientes Bfr=8 Control=8	Estimulos oclusivos sin ejercitacion	5 Estimulos2 X Día 5' oclusion x 3' Flujo libre	2 Semanas	Amortizo la hipotrofia por desuso	RMN
Iversen(23)	Post qx -LCA	130 Y 180mmhg	24 pacientes Bfr= 12 Control =12	Iso cuadriceps 20 repeticiones c/oclusión de 5	2 x dia	2 semanas	No evidencio cambiossignificativos	RMN
Xuefeng Li (24)	Post qx -LCA	40% POA 80% POA	23 pacientes Control=6 40% poa=9 80%poa=8	S1 = iso de rodilla S2=Sentadilla iso S3= sentadilla/estocada iso S4= Step up S5= extension c/resistencia S6= sentadilla c/resistencia S7= sentadilla unipodales S8=estocadas c/resistencia	30x15x15x15 2 x semana 60' duracion	8 semanas	Aumento de fuerza y csa en grupo con oclusion Mayores aumentos a presion de 80% poa	Maquina isocinética Dinamómetro

Kilgas(26)	Post qx -LCA	50%POA	18 pacientes Bfr=9 Control=9	Extension de rodilla Sentadilla(peso corporal) Caminata	3x30 3x30 5 estímulos x semana	4 semanas	Aumento de diametro de recto femoral y vasto lateral Aumento de fuerza en la extension de rodilla	Ultrasonido Maquina isocinética
Tennent(29)	Artroscopia de rodilla	80% POA	17 pacientes Bfr=10 Control=7	Extensiones de rodilla	4 Series 30x15x15x15 3 x semana	6 semanas	Aumento de Csa y fuerza muscular	Ecografía
Hansen(30)	Sanos	110mmHg	18 pacientes Bfr-alta intensidad=9 Control=9	Prensa unil Ext. Rodillas	2 x semana	6 semanas	Aumento de Csa y fuerza muscular	Dinamómetro
Centner(31)	Sanos	50%POA	40 Pacientes BFR=20 Control=20	Elevacion de talon	30x15x15x15 3x semana	14 semanas	Aumento de fuerza en la flexion plantar Aumento del grosor del tendon	RMN
Colomer Poveda(32)	Sanos	150-210mmHg	22 Pacientes CTR= 7(control) BFR=8 (oclusion) LLRT=7 (baja carga)	Contracciones de soleo unilateral	3 x semana 30x15x15x15	4 semanas	Aumento de fuerza e hipertrofia del soleo	RMN
Shiromaru(33)	Sanos	80%POA	18 Pacientes	Extension unil de rodilla	4x5 30x15x15x15	3 semanas	Aumento de csa del cuadriceps	RMN
Kubota(34)	Sanos Inmovilización inducida	200mmhg	15 Pacientes sanos BFR=5 IMT=5 (entrenamiento isometrico) Control=5	5' oclusion 3' flujo libre	5 x sesión 2x dia	2 semanas	Bfr disminuyo la perdida de fuerza y masa muscular	

*TABLA DE CONTENIDO Y ANÁLISIS SOBRE LA APLICACIÓN DE BFR EN DIFERENTES GRUPOS DE PACIENT

VIII CONCLUSIONES

Mediante la investigación realizada, se concluye que la implementación de BFRT aporta grandes beneficios a la hora de estimular la hipertrofia y el desarrollo de la fuerza. Esto quedó demostrado en diferentes estudios tanto en personas sanas como en pacientes que atraviesan una etapa de rehabilitación.

Con relación al uso de BFRT en pacientes con reconstrucción del LCA se halló que aplicar protocolos de 75 repeticiones divididas en cuatro series (30-15-15-15) con una frecuencia semanal de dos a tres veces genera adaptaciones en los niveles de fuerza y aumento del CSA del cuádriceps en un porcentaje mayor que con las terapias más convencionales que no incluyeron ejercicios activos en las primeras etapas de la rehabilitación.

Además de mejorar el desarrollo de la fuerza, los hallazgos indican que incluso en los primeros 15 días luego de la cirugía, aplicar BFRT sin ejercitación reduce el impacto de la hipotrofia muscular de los extensores de rodilla que la inmovilización y el desuso generan.

Las respuestas en el organismo estarían relacionadas fisiológicamente con el complejo mTORC1, que desempeña un papel fundamental en la vía de señalización anabólica, promoviendo el trofismo muscular, sobre todo en las fibras musculares tipo II, que según las investigaciones son las más sensibles a los efectos de la hipoxia y las principales responsables de la hipertrofia generada, ya que las fibras tipo I no evidenciaron muchos cambios.

Las fronteras de la utilización BFRT no se limitan solo a la musculatura, sino que también logra generar adaptaciones en el aparato tendinoso. Hay registros donde la terapia oclusiva y el ejercicio activo demostró aumentos del CSA de los tendones en porcentajes más elevados que en los grupos de control.

La bibliografía analizada también sugiere que, además de combinar BFRT con trabajos de fuerza, la técnica puede realizarse con ejercicio aeróbico, como por ejemplo caminata o bicicleta, evidencia que les permite a los profesionales de la salud ampliar el abanico de sus planificaciones.

La evidencia actual demuestra que el BFRT puede ser una herramienta útil en la rehabilitación de pacientes operados de LCA y que puede contribuir significativamente a la mejora de la fuerza muscular, la reducción de la hipotrofia y la mejora funcional.

Es importante que el tratamiento con BFRT se integre dentro de un plan de rehabilitación personalizada y multidisciplinaria, que incluya ejercicios de fortalecimiento, movilidad y propiocepción, para lograr una recuperación adecuada.

IX BIBLIOGRAFÍA

1. 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*. 2020;28(12):e493–500.
2. Li S, Shaharudin S, Abdul Kadir MR. Effects of Blood Flow Restriction Training on Muscle Strength and Pain in Patients With Knee Injuries: A Meta-Analysis. *Am J Phys Med Rehabil*. 2021;100(4):337–44.
3. Lorenz DS, Bailey L, Wilk KE, Mangan RE, Head P, Grindstaff TL, et al. Blood Flow Restriction Training. *J Athl Train*. 2021;56(9):937–44.
4. Birchmeier T, Lisee C, Kane K, Brazier B, Triplett A, Kuenze C. Quadriceps Muscle Size Following ACL Injury and Reconstruction: A Systematic Review. *J Orthop Res*. 2020;38(3):598–608.
5. Hughes L, Paton B, Rosenblatt B, Gissane C, Patterson SD. Blood flow restriction training in clinical musculoskeletal rehabilitation: A systematic review and meta-analysis. *Br J Sports Med*. 2017;51(13):1003–11.
6. Hassebrock JD, Gulbrandsen MT, Asprey WL, Makovicka JL, Chhabra A. Knee ligament anatomy and biomechanics. *Sports Med Arthrosc*. 2020;28(3):80–6.
7. Szymiski D, Achenbach L, Zellner J, Weber J, Koch M, Zeman F, et al. Higher risk of ACL rupture in amateur football compared to professional football: 5-year results of the ‘Anterior cruciate ligament-registry in German football.’ *Knee Surgery, Sport Traumatol Arthrosc*. 2022;30(5):1776–85.
8. Kaeding CC, Léger-St-Jean B, Magnussen RA. Epidemiology and Diagnosis of Anterior Cruciate Ligament Injuries. *Clin Sports Med [Internet]*. 2017;36(1):1–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.csm.2016.08.001>
9. Baron JE, Parker EA, Duchman KR, Westermann RW. Perioperative and Postoperative Factors Influence Quadriceps Atrophy and Strength After ACL Reconstruction: A Systematic Review. *Orthop J Sport Med*. 2020;8(6):1–10.
10. Charles D, White R, Reyes C, Palmer D. a Systematic Review of the Effects of Blood Flow Restriction Training on Quadriceps Muscle Atrophy and

- Circumference Post Acl Reconstruction. *Int J Sports Phys Ther.* 2020;15(6):882–91.
11. Koc BB, Truyens A, Heymans MJLF, Jansen EJP, Schotanus MGM. Effect of Low-Load Blood Flow Restriction Training After Anterior Cruciate Ligament Reconstruction: A Systematic Review. *Int J Sports Phys Ther.* 2022;17(3):334–46.
 12. Rolnick N, Schoenfeld BJ. Blood Flow Restriction Training and the Physique Athlete: A Practical Research-Based Guide to Maximizing Muscle Size. *Strength Cond J.* 2020;42(5):22–36.
 13. Jack RA, Lambert BS, Hedt CA, Delgado D, Goble H, McCulloch PC. Blood Flow Restriction Therapy Preserves Lower Extremity Bone and Muscle Mass After ACL Reconstruction. *Sports Health.* 2022;15(3):361–71.
 14. Vanwyke WR, Weatherholt AM, Mikesky AE. Blood Flow Restriction Training: Implementation into Clinical Practice. *Int J Exerc Sci [Internet].* 10(5):649–54. Available from:
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28966705>
<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC5609669>
 15. Patterson SD, Hughes L, Warmington S, Burr J, Scott BR, Owens J, et al. Blood flow restriction exercise position stand: Considerations of methodology, application, and safety. *Front Physiol.* 2019;10(MAY):1–15.
 16. Takarada Y, Nakamura Y, Aruga S, Onda T, Miyazaki S, Ishii N. Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion. *J Appl Physiol.* 2000;88(1):61–5.
 17. Clarkson MJ, May AK, Warmington SA. Is there rationale for the cuff pressures prescribed for blood flow restriction exercise? A systematic review. *Scand J Med Sci Sport.* 2020;30(8):1318–36.
 18. Reilly CW, McEwen JA, Leveille L, Perdios A, Mulpuri K. Minimizing tourniquet pressure in pediatric anterior cruciate ligament reconstructive surgery: A blinded, prospective randomized controlled trial. *J Pediatr Orthop.* 2009;29(3):275–80.

19. Callanan MC, Plummer HA, Chapman GL, Opitz TJ, Rendos NK, Anz AW. Blood Flow Restriction Training Using the Delfi System Is Associated With a Cellular Systemic Response. *Arthrosc Sport Med Rehabil* [Internet]. 2021;3(1):e189–98. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.asmr.2020.09.009>
20. Picón MM, Chulvi IM, Cortell JMT, Tortosa J, Alkhadar Y, Sanchís J, et al. Acute Cardiovascular Responses after a Single Bout of Blood Flow Restriction Training. *Int J Exerc Sci* [Internet]. 2018;11(2):20–31. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29795722><http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC5955310>
21. Miller BC, Tirko AW, Shipe JM, Sumeriski OR, Moran K. The systemic effects of blood flow restriction training: A systematic review. *Int J Sports Phys Ther*. 2021;16(4):978–90.
22. Hughes L, Grant I, Patterson SD. Aerobic exercise with blood flow restriction causes local and systemic hypoalgesia and increases circulating opioid and endocannabinoid levels. *J Appl Physiol*. 2021;131(5):1460–8.
23. Iversen E, Røstad V, Larmo A. Intermittent blood flow restriction does not reduce atrophy following anterior cruciate ligament reconstruction. *J Sport Heal Sci* [Internet]. 2016;5(1):115–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jshs.2014.12.005>
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. 2023;1–14.
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. *Sport Med* [Internet]. 2019;49(11):1787–805. Available from: <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01137-2>
26. Kilgas MA, Lytle LLM, Drum SN, Elmer SJ. Exercise with Blood Flow Restriction to Improve Quadriceps Function Long after ACL Reconstruction. *Int*

- J Sports Med. 2019;40(10):650–6.
27. Ohta H, Kurosawa H, Ikeda H, Iwase Y, Satou N, Nakaura S. Low-load resistance muscular training with moderate restriction of blood fl...: EBSCOhost. *Acta Orthop Scand* [Internet]. 2003;74(1):62–8. Available from: <http://web.b.ebscohost.com/ehost/command/detail?vid=36&sid=f97a61d2-a40c-401d-8df6-c1a673864059%40sessionmgr102&bdata=JnNpdGU9ZW9vc3QtbGl2ZQ%3D%3D#AN=9338755&db=s3h>
 28. Takarada Y, Takazawa H, Ishii N. Applications of vascular occlusion diminish disuse atrophy of knee extensor muscles. *Med Sci Sports Exerc.* 2000;32(12):2035–9.
 29. Tennent DJ, Hylden CM, Johnson AE, Burns TC, Wilken JM, Owens JG. Blood flow restriction training after knee arthroscopy: A randomized controlled pilot study. *Clin J Sport Med.* 2017;27(3):245–52.
 30. Hansen SK, Ratzer J, Nielsen JL, Suetta C, Karlsen XA, Kvorning T, et al. Effects of alternating blood flow restricted training and heavy-load resistance training on myofiber morphology and mechanical muscle function. *J Appl Physiol.* 2020;128(6):1523–32.
 31. Centner C, Jerger S, Lauber B, Seynnes O, Friedrich T, Lolli D, et al. Similar patterns of tendon regional hypertrophy after low-load blood flow restriction and high-load resistance training. *Scand J Med Sci Sport.* 2023;33(6):848–56.
 32. Colomer-Poveda D, Romero-Arenas S, Vera-Ibáñez A, Viñuela-García M, Márquez G. Effects of 4 weeks of low-load unilateral resistance training, with and without blood flow restriction, on strength, thickness, V wave, and H reflex of the soleus muscle in men. *Eur J Appl Physiol.* 2017;117(7):1339–47.
 33. Shiromaru FF, de Salles Painelli V, Silva-Batista C, Longo AR, Lasevicius T, Schoenfeld BJ, et al. Differential muscle hypertrophy and edema responses between high-load and low-load exercise with blood flow restriction. *Scand J Med Sci Sport.* 2019;29(11):1713–26.
 34. Kubota A, Sakuraba K, Sawaki K, Sumide T, Tamura Y. Prevention of disuse muscular weakness by restriction of blood flow. *Med Sci Sports Exerc.*

2008;40(3):529–34.