

Máximo volumen adaptativo del cuádriceps con un entrenamiento excéntrico isocinético a 180°/s

TRABAJO FIN DE GRADO

**FACULTAD CIENCIAS DE LA ACTIVIDAD
FÍSICA Y EL DEPORTE**



Realizado por: Diego Barrio Pérez y Luis Alejandro Llorente González

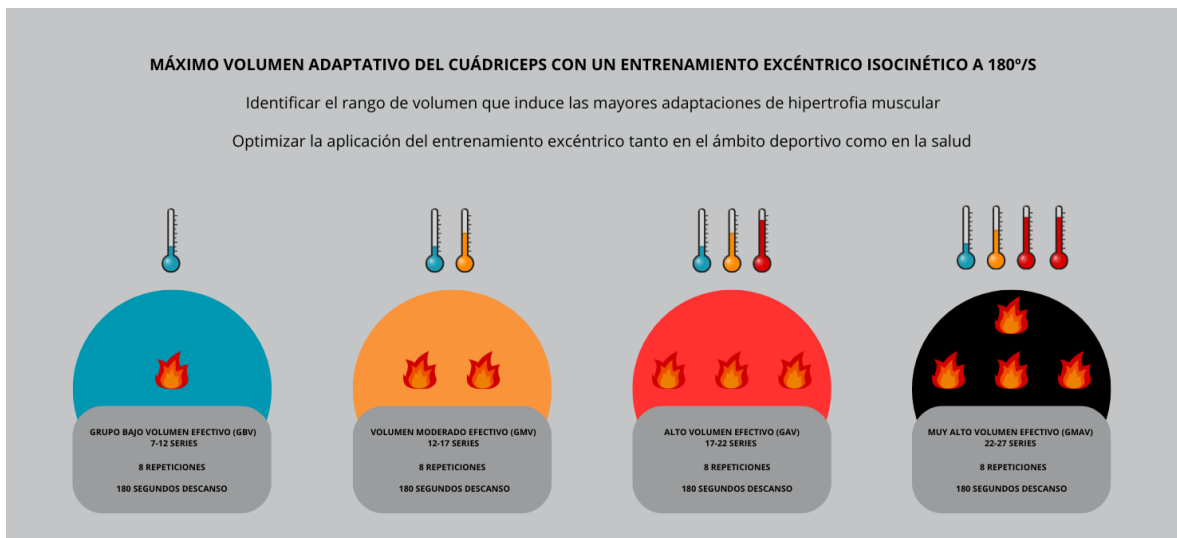
Año Académico: 2024-2025

Tutor/a: Susana Moral González

Área: Diseño de un estudio experimental

2. Resumen

2.1. Resumen gráfico



Fuente: Elaboración propia.

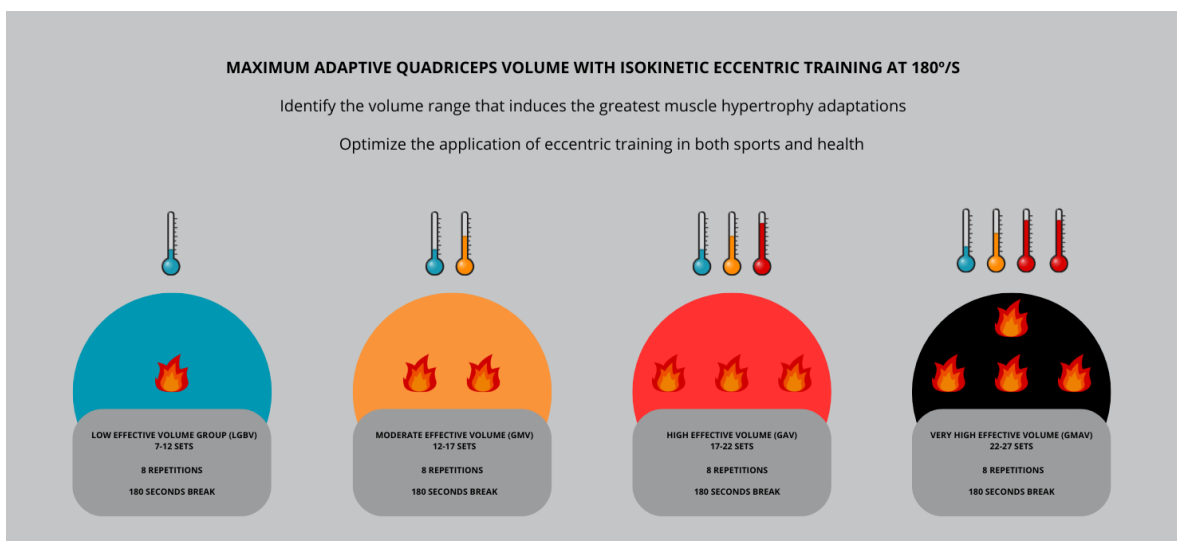
2.2. Resumen

Este estudio experimental analiza el máximo volumen adaptativo (MAV) en el entrenamiento excéntrico isocinético del cuádriceps a 180°/s, con el objetivo de identificar el rango de volumen que induce las mayores adaptaciones de hipertrofia muscular. El trabajo parte de la evidencia de que las contracciones excéntricas generan mayor tensión mecánica por fibra muscular y estimulan preferentemente las fibras tipo II, favoreciendo la hipertrofia y el aumento del torque muscular mediante la activación de vías de señalización celular como la MAPK, además se han observado aumentos en la proliferación de células satélite en el tejido muscular, lo que a medio largo plazo podría ser positivo para el potencial de hipertrofia. Se emplea un diseño experimental aleatorizado con cuatro grupos (bajo, moderado, alto y muy alto volumen), integrados por adultos jóvenes no entrenados, que realizan extensiones de cuádriceps en máquina isocinética. Las variables principales incluyen el área de sección transversal

(CSA) del cuádriceps, biomarcadores de daño muscular, electromiografía, ángulo de penación y torque excéntrico/isométrico, evaluados antes y después de la intervención. Se espera demostrar que un mayor volumen de entrenamiento excéntrico a alta velocidad incrementa significativamente la hipertrofia, el ángulo de penación y el torque, y que la exposición repetida reduce el daño muscular gracias al efecto de la repetición. Este estudio busca optimizar la aplicación del entrenamiento excéntrico tanto en el ámbito deportivo como en la salud.

Palabras clave: entrenamiento excéntrico, isocinético, hipertrofia muscular, volumen adaptativo

2.3. Graphical abstract



Fuente: Elaboración propia.

2.4. Abstract

This experimental study analyzes the maximum adaptive volume (MAV) in isokinetic eccentric quadriceps training at 180°/s, with the aim of identifying the volume range that induces the greatest muscle hypertrophy adaptations. The work is based on the evidence that eccentric contractions generate greater mechanical

tension per muscle fiber and preferentially stimulate type II fibers, promoting hypertrophy and increased muscle torque through the activation of cellular signaling pathways such as MAPK. In addition, increases in satellite cell proliferation in muscle tissue have been observed, which in the medium to long term could be positive for hypertrophy potential. A randomized experimental design is used with four groups (low, moderate, high, and very high volume), composed of untrained young adults who perform quadriceps extensions on an isokinetic machine. Primary outcomes include quadriceps cross-sectional area (CSA), muscle damage biomarkers, electromyography, pennation angle, and eccentric/isometric torque, assessed before and after the intervention. It is hoped to demonstrate that a higher volume of high-velocity eccentric training significantly increases hypertrophy, pennation angle, and torque, and that repeated exposure reduces muscle damage through the repetition effect. This study seeks to optimize the application of eccentric training in both sports and healthcare settings.

Keywords: eccentric training, isokinetic, muscle hypertrophy, adaptive volume

Índice

2. Resumen	2
2.1. Resumen gráfico	2
2.2. Resumen	2
2.3. Graphical abstract	3
2.4. Abstract	3
4. Introducción	6
5. Justificación	7
6. Objetivos e hipótesis del estudio	9
7. Metodología	10
7.1. Diseño	10
7.2. Muestra y formación de grupos	11
7.3. Variables y material de medida	13
7.4. Procedimiento	14
7.5. Análisis de datos	18
8. Equipo investigador	19
9. Viabilidad del estudio	20
9.1. Viabilidad	20
9.2. Limitaciones	23
10. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).	24
11. Referencias bibliográficas	26
12. Anexos	30

4. Introducción

La hipertrofia muscular se define como el aumento del tamaño de las fibras musculares debido a la síntesis neta de proteínas contráctiles y estructurales, lo que incrementa el área de sección transversal (CSA) y el volumen muscular (Hortobagyi et al., 1996; Franchi et al., 2014). En los estudios analizados, se distingue entre dos tipos de adaptaciones morfológicas:

1. Hipertrofia por adición de sarcómeros en paralelo: aumenta el ángulo de penación, permitiendo mayor densidad de fibras por unidad de área (Franchi et al., 2014).
2. Hipertrofia por adición de sarcómeros en serie: alarga la longitud de los fascículos musculares, favoreciendo la transmisión de fuerzas a lo largo del vientre muscular (Hortobagyi et al., 1996; Franchi et al., 2014).

Las contracciones excéntricas se definen como acciones musculares dinámicas en las que las fibras del músculo esquelético se alargan bajo tensión mientras generan fuerza, un fenómeno fisiológico opuesto a las contracciones concéntricas, donde las fibras se acortan activamente (Schoenfeld et al., 2017). Según ese metaanálisis, este tipo de contracciones se caracterizan por una mayor capacidad para resistir cargas externas (20-50% superiores a las concéntricas), lo que permite generar fuerzas mecánicas significativas durante la fase de elongación del sarcómero.

Las contracciones excéntricas generan mayores tensiones mecánicas a menor costo metabólico, lo que estimula preferentemente fibras tipo II. Esto induce elongación de fascículos (+12%) y reclutamiento neural específico, vinculado a la activación de vías como MAPK “Mitogen-Activated Protein Kinase” (quinasa activada por mitógenos) (p38 y ERK1/2) Extracellular signal-Regulated Kinase (quinasa regulada por señales extracelulares) (Hortobagyi et al., 1996; Franchi et al., 2014).

El daño muscular inducido por el ejercicio excéntrico ha sido ampliamente estudiado. Clarkson y Hubal (2002) reportaron que las contracciones excéntricas pueden causar alteraciones celulares y subcelulares, especialmente el streaming de líneas Z observado en biopsias musculares.

Además, se ha documentado una disminución prolongada de la producción de fuerza, especialmente a bajas frecuencias de estimulación, un fenómeno conocido como fatiga de baja frecuencia (LFF) (Clarkson & Hubal, 2002) que se correlaciona con el daño muscular inducido por ejercicio excéntrico, actuando como un indicador indirecto válido de daño muscular. Las máquinas isocinéticas son un sistema de evaluación y rehabilitación computarizado que permite realizar movimientos a una velocidad constante preestablecida. Estos sistemas adaptan la resistencia dinámicamente para mantener la velocidad angular seleccionada a lo largo de todo el rango de movimiento, independientemente de la fuerza aplicada por el usuario. A través de accesorios específicos, permite evaluar y entrenar diversas articulaciones, proporcionando datos objetivos sobre la fuerza, potencia y trabajo muscular en diferentes velocidades. Revisar **Anexo 9.8. Figura 4.**

5. Justificación

La hipertrofia muscular, definida como el aumento del tamaño de las fibras musculares individuales y, en consecuencia, del músculo en su conjunto, tras un proceso adaptativo al entrenamiento de fuerza (Schoenfeld, 2016), emerge como un pilar fundamental no solo en el ámbito del rendimiento deportivo y la estética, sino también en la salud y la calidad de vida a lo largo de todas las etapas vitales. La comprensión de los mecanismos que rigen la hipertrofia y su aplicación práctica se ha consolidado como un área de conocimiento esencial en las ciencias del ejercicio.

La investigación sobre el entrenamiento excéntrico ha demostrado su potencial para inducir adaptaciones musculares significativas. Diversos estudios han

explorado los efectos de diferentes velocidades de contracción excéntrica en estas adaptaciones. Por ejemplo, Hortobágyi et al. (1996) observaron una mayor hipertrofia de las fibras musculares tipo II al utilizar una velocidad de contracción excéntrica de aproximadamente 60°/s (1.05 rad/s) en comparación con el entrenamiento concéntrico, aunque no se investigaron velocidades más altas.

Investigaciones posteriores sugieren que velocidades excéntricas más elevadas podrían ser particularmente efectivas. Maeo et al. (2018) en su estudio utilizando 180°/s, apoyaron esta teoría. De manera similar, Shepstone et al. (2005) encontraron mayores aumentos en el área de las fibras tipo IIa y IIx en el brazo entrenado a una velocidad excéntrica alta (3.66 rad/s) en comparación con una velocidad baja (0.35 rad/s). Además, Paddon-Jones et al. (2001) observaron cambios en la composición de las fibras musculares hacia un perfil más glucolítico (reducción de tipo I y aumento de tipo IIb) con entrenamiento excéntrico a altas velocidades (3.14 rad/s vs. 0.52 rad/s).

No obstante, no todos los estudios respaldan consistentemente esta idea. Kim et al. (2014) no encontraron un apoyo claro para esta teoría al utilizar una velocidad de 60°/s en su investigación sobre la arquitectura del músculo supraespinoso. De igual manera, en el estudio de Franchi et al. (2014) con una máquina modificada, tampoco encontraron resultados concluyentes que apoyaran una mayor hipertrofia con una velocidad excéntrica específica.

El estudio propuesto es necesario para comprobar si la hipótesis presentada de que la velocidad de la contracción en máquina isocinética es capaz de aumentar exponencialmente la hipertrofia muscular y así optimizar su aplicación en diversos contextos, desde el rendimiento deportivo hasta la salud. Aún así, no hay nada concluyente al respecto.

6. Objetivos e hipótesis del estudio

Objetivo principal:

Localizar el rango de volumen máximo adaptativo (MAV) del método excéntrico en máquina isocinética a 180°/s que induzca máximas adaptaciones de hipertrofia muscular, ya sea en serie o en paralelo.

Objetivos específicos:

Valorar el daño muscular mediante biomarcadores, biopsias musculares en la unión miotendinosa y a mitad del vientre muscular, cuestionarios de DOMS, tiempo de relajación mediante MRI y la adaptación a ese daño muscular por el repeated bout effect a lo largo de las sesiones.

Medir el grosor muscular (CSA), la electromiografía y el ángulo de penetración pre intervención y post intervención del cuádriceps.

Analizar la mejora del torque excéntrico e isométrico.

Hipótesis primaria:

La hipótesis que se plantea en este estudio es que la longitud de los sarcómeros del cuádriceps se verá aumentada influyendo en su longitud operativa y que el CSA del cuádriceps se verá aumentada de forma significativa con el consiguiente aumento del ángulo de penetración y un aumento del torque excéntrico e isométrico. Se espera encontrar una correlación entre un volumen alto y una mayor hipertrofia como observaron Baz-Valle et al. (2022) en su trabajo de revisión.

Hipótesis secundarias:

La exposición repetida al método excéntrico a 180°/s genera una reducción progresiva del daño muscular, evidenciada por la disminución de los biomarcadores de daño, del dolor muscular percibido (DOMS) y del tiempo de relajación en MRI, debido al efecto de la repetición (Repeated Bout Effect) como podemos observar en uno de los grupos de la investigación de Hody et al. (2019).

El entrenamiento excéntrico en máquina isocinética a 180°/s mejorará significativamente la producción de torque excéntrico e isométrico del cuádriceps después de la intervención.

7. Metodología

7.1. Diseño

Nuestro tipo de investigación es experimental aleatorizado con una duración de 30 semanas. Dos semanas será el tiempo que necesitaremos para hacer la biopsia y todas las mediciones basales iniciales y el inicio del periodo de familiarización para permitir la adecuada recuperación del tejido. Seis semanas de familiarización para beneficiarnos del efecto protector del “repeated bout effect” dando tiempo para que los tejidos se adapten y se reduzca el daño muscular (Clarkson & Hubal, 2002; Hody et al., 2019) con una velocidad angular la primera semana de 60°/s, la segunda semana de 100°/s y a partir de ahí un incremento semanal las últimas cuatro semanas de adaptación de 20°/s hasta alcanzar la velocidad angular objetivo de 180°/s.

El volumen semanal inicial será el rango inferior de cada grupo asignado (GBV: 7, GMV: 12, GAV: 17 y GMAV: 22).

Con veinte semanas de duración de la intervención con la aplicación del volumen de trabajo semanal y velocidades planteadas.

Consideramos que 20 semanas de duración es un lapso temporal interesante para medir la hipertrofia muscular, ya que muchos trabajos son con duraciones considerablemente inferiores de entre 6-12 semanas. Por último utilizaremos 2 últimas para poder analizar los datos.

Habrán 4 grupos con diferentes rangos de volúmenes de entrenamiento, modificándose los volúmenes de entrenamientos entre cada grupo para evaluar sus efectos, además para mantener una sobrecarga progresiva que garantice la necesidad de adaptación por parte del organismo se añadirá una serie cada dos semanas hasta la mitad del estudio, añadiendo 5 series a las planteadas al inicio del protocolo. La inclusión de los participantes a los grupos será de forma aleatoria y estará cegada para evitar sesgos.

7.2. Muestra y formación de grupos

Criterios de Inclusión:

- Hombres y mujeres.
- Rango de edad: adultos de entre 18-35 años.
- Etnia caucásica: blanca o indoeuropea, por suponerla oriunda del Cáucaso.
- Estudiantes y empleados de la Universidad Europea de Madrid.
- Estado físico de los sujetos: no entrenados.
- Ausencia de lesiones o patologías musculoesqueléticas recientes.
- Buena salud hormonal previa al estudio.
- Comprometerse a no realizar más entrenamientos de fuerza para no generar confusión.
- No tomar AINES ni realizar protocolos de duchas frías durante toda la intervención.

Criterios de Exclusión:

- Participación en programas de entrenamiento de resistencia en los meses previos al estudio (12 meses).
- Experiencia previa reciente (12 meses) con ejercicios que causen daño muscular significativo.
- Presencia de lesiones en las piernas.
- Desbalances hormonales.

La determinación del tamaño muestral se ha realizado mediante un análisis de potencia estadística, ajustándose a los criterios de la Universidad Europea para garantizar la validez y la capacidad de detectar efectos significativos. Este enfoque reemplaza una justificación inicial basada en la replicación, la cual se considera insuficiente.

Empleando los parámetros de Marzilger et al. (2019) (potencia deseada: 0.95; tamaño del efecto (d de Cohen): 0.47; nivel de significación (α): 0.05), el cálculo arrojó un mínimo de 6 participantes por grupo.

Considerando una tasa de abandono esperada del 40%, la muestra total se ajustó para asegurar la robustez del estudio. Así, se reclutará un total de 40 participantes (10 por grupo), para garantizar una muestra final de 24 individuos tras las posibles pérdidas.

La asignación de los participantes a los cuatro grupos se realizará de forma aleatoria mediante software estadístico, gestionado por un investigador independiente para asegurar el doble ciego y minimizar sesgos. Este rigor metodológico optimiza la calidad del estudio conforme a los estándares de investigación experimental.

Formación de grupos

Probabilístico: todos los individuos tienen la probabilidad de ser elegidos en cualquiera de los cuatro grupos que formaremos en nuestro estudio.

La persona que va a realizar este proceso de asignación de personas a cada grupo y que gestione el software de asignación aleatorizada a los grupos, va a ser ajena a esta investigación, por lo que no va haber capacidad de sesgar el proceso; por otro lado, los sujetos tampoco sabrán a qué grupo se les ha asignado (doble-ciego).

Habrán un total de 4 grupos: bajo volumen, volumen moderado, alto volumen como clasifica (Baz-Valle et al., 2022), pero añadiendo un escalón más por encima del alto volumen que sería el grupo de muy alto volumen.

- Grupo bajo volumen efectivo (GBV) de 7-12 series.
- Volumen moderado efectivo (GMV) de 12-17 series.
- Alto volumen efectivo (GAV) de 17-22 series.
- Muy alto volumen efectivo (GMAV) de 22-27 series.

7.3. Variables y material de medida

Para dar respuesta al objetivo principal, la variable a medir será el CSA del cuádriceps: cuantitativa continua, imagen por Resonancia Magnética (MRI) de alto campo Siemens Magnetom Prisma 3T, se toman imágenes axiales del muslo a nivel del vientre medio del cuádriceps. Se mide el área de sección transversal (CSA) antes y después del protocolo. El sujeto está en posición supina y relajado. (Anexo 9.4.), (Anexo 9.5.) y (Anexo 9.6.)

Creatina Kinasa (CK - concentración en sangre): Cuantitativa - Continua. Se midió mediante ensayo ELISA en suero sanguíneo.

Proteína C Reactiva (PCR - concentración en sangre): Cuantitativa - Continua. Se medirá mediante inmunoturbidimetría o ELISA en suero.

Mioglobina (concentración en sangre): Cuantitativa - Continua. Se medirá mediante quimioluminiscencia o ELISA en suero.

Ángulo de penación del cuádriceps: cuantitativa continua, ecografía musculoesquelética Esaote MyLab 70 XVision. Se mide el ángulo formado entre las fibras musculares y la aponeurosis profunda con el participante en reposo.

Actividad electromiográfica (EMG) del cuádriceps: cuantitativa continua, electromiógrafo de superficie Delsys Trigno Wireless System. Se colocan electrodos en los músculos del cuádriceps. Se registra la actividad durante las contracciones excéntricas a 180°/s en la máquina isocinética.

Torque excéntrico del cuádriceps: cuantitativa continua, dinamómetro isocinético Cybex Norm. Se registra el pico de torque generado durante las contracciones excéntricas a 180°/s. Se realiza un protocolo de familiarización previo.

Volumen Máximo Adaptativo (MAV): cuantitativa discreta (número de series o sesiones hasta alcanzar pico adaptativo), cálculo derivado de progresión de volumen vs adaptación. Se analiza a partir del punto donde las mejoras de hipertrofia se estabilizan o decrecen ante aumentos de volumen.

7.4. Procedimiento

Ejercicio: extensión de cuádriceps unilateral en una máquina isocinética calibrada. Velocidad angular de la fase excéntrica: 180°/s.

Intensidad: 100% de la contracción excéntrica voluntaria máxima.

Frecuencia:

- Grupo de bajo volumen (7-12) realizarán una frecuencia dos de entrenamiento en la que el volumen total se dividirá entre los dos días de forma equitativa.
- Grupo de medio volumen (12-17) realizarán una frecuencia dos de entrenamiento en la que el volumen total se dividirá entre los dos días de forma equitativa.
- Grupo de alto volumen (17-22) realizarán una frecuencia dos de entrenamiento en la que el volumen total se dividirá entre los dos días de forma equitativa.
- Grupo de muy alto volumen (22-27) realizarán una frecuencia tres de entrenamiento en la que el volumen total se dividirá entre los tres días de forma equitativa, $\frac{1}{3}$ del volumen total cada sesión.

Repeticiones por serie: 8 repeticiones.

Descanso entre series: 180 segundos.

Variables de medición:

Se realizarán mediciones previas dos semanas antes de comenzar las seis semanas de adaptación (2º semana total), medias en la 6º semana de familiarización (8º semana total) y en la 10º semana de protocolo (18º semana total) con técnicas de medición no invasivas y finales del período de entrenamiento semana 20º del protocolo (28º semana total). (Anexo 9.4), (Anexo 9.5.) y (Anexo 9.6.)

1. Hipertrofia muscular:

Área de Sección Transversal del Cuádriceps (RM): Medida mediante resonancia magnética (RM) en puntos específicos del muslo (por ejemplo, 50% y 70% de la longitud del fémur). Esta será la variable primaria de resultado.

2. Arquitectura muscular:

Ángulo de Penación del Vasto Lateral (US): Medido mediante ultrasonido (US) en múltiples puntos y promediado. Grosor Muscular del Vasto Lateral (US): Medido mediante ultrasonido (US) en puntos específicos.

3. Actividad electromiográfica (EMG):

Medida durante la ejecución de series submáximas del ejercicio de extensión de cuádriceps a 180°/s para evaluar la activación muscular en los diferentes grupos a lo largo del tiempo. Se registrará la actividad del vasto lateral, recto femoral y vasto medial.

4. Biopsias musculares:

Se tomarán biopsias del músculo vasto lateral antes y después del entrenamiento (si es éticamente factible y se obtienen los permisos necesarios) para analizar:

Área de sección transversal de las fibras musculares tipo I y tipo II.

Contenido de proteínas específicas relacionadas con la síntesis proteica muscular (por ejemplo, mTOR o MAPK).

5. Marcadores de daño muscular e inflamación:

Creatina Kinasa (CK): Medida en sangre en reposo 24 y 48 horas después de sesiones de entrenamiento específicas (por ejemplo, la primera sesión y una sesión a mitad del estudio).

Proteína C Reactiva (PCR): Medida en sangre en reposo antes, a la mitad y después del entrenamiento.

Mioglobina: Medida en sangre en reposo 24 y 48 horas después de sesiones de entrenamiento específicas.

Procedimientos (Anexo 9.7.):

1. Selección y consentimiento informado: los participantes serán reclutados y se les proporcionará información detallada sobre el estudio antes de firmar el consentimiento informado.
2. Evaluación inicial (pre-entrenamiento): se realizarán todas las mediciones basales (RM, US, EMG, sangre, biopsia si aplica). También se evaluará el torque máximo excéntrico a 180°/s para determinar la intensidad de entrenamiento dos semanas previas al inicio de la familiarización.
3. Fase de entrenamiento: los participantes asistirán a las sesiones de entrenamiento 2-3 veces por semana durante 26 semanas, siguiendo el protocolo asignado a su grupo. Se monitorizará la adherencia al entrenamiento.
4. Evaluaciones intermedias y finales: se repetirán las mediciones de arquitectura muscular no invasivas a la mitad del procedimiento y al final del período de entrenamiento se volverán a realizar las evaluaciones no invasivas junto a las biopsias musculares.

El estudio implica investigación con seres humanos, incluyendo la toma de biopsias musculares y análisis de biomarcadores en sangre, por lo que requiere la aprobación de un CEI. Este comité tiene como misión "garantizar el respeto a la dignidad, integridad e identidad del ser humano en lo que se refiere a la investigación con humanos, con muestras biológicas o con datos de origen humano, así como promover un comportamiento ético en la investigación".

El estudio debe adherirse a los "principios establecidos en la Declaración de Helsinki, la Guía de Buenas Prácticas Clínicas (GCP) de la ICH (International Council for Harmonization) y la legislación nacional vigente", tal como se recomienda para investigaciones que involucran participantes humanos.

Dado que el estudio se realiza en la Universidad Europea de Madrid y los participantes son estudiantes y empleados de la Universidad Europea de Madrid, se solicita la aprobación del comité ético de esta institución. La Universidad Europea de Madrid acoge y apoya las recomendaciones de la Comisión Europea que contienen la 'Carta Europea de Investigadores' y el 'Código de Conducta para el Reclutamiento de Investigadores'.

7.5. Análisis de datos

En cuanto al Área de Sección Transversal (CSA) del cuádriceps: calcular el cambio en el CSA (post-entrenamiento menos pre-entrenamiento) para cada participante. Utilizar un ANOVA de medidas repetidas para comparar los cambios en el CSA entre los cuatro grupos (bajo, moderado, alto y muy alto volumen).

En creatina Kinasa (CK), Proteína C Reactiva (PCR) y Mioglobina: se medirá la concentración en sangre de estos biomarcadores antes, durante y después del protocolo de entrenamiento. Utilizar un ANOVA de medidas repetidas para comparar los cambios en los niveles de CK, PCR y mioglobina entre los cuatro grupos a lo largo del tiempo.

Ángulo de Penación del cuádriceps: se medirá el ángulo formado entre las fibras musculares y la aponeurosis profunda mediante ecografía musculoesquelética. Utilizar un ANOVA de medidas repetidas para comparar los cambios en el ángulo de penación entre los cuatro grupos.

Actividad Electromiográfica (EMG) del cuádriceps: se registrará la actividad EMG durante las contracciones excéntricas a 180°/s. Normalizar los datos de EMG (ej., como porcentaje de la contracción voluntaria máxima). Calcular el promedio de la actividad EMG durante las contracciones excéntricas para cada participante. Utilizar un ANOVA de medidas repetidas para comparar los cambios en la actividad EMG entre los cuatro grupos.

Torque Excéntrico del cuádriceps: se registrará el pico de torque generado durante las contracciones excéntricas a 180°/s. Calcular el cambio en el torque

excéntrico (post-entrenamiento menos pre-entrenamiento) para cada participante. Utilizar un ANOVA de medidas repetidas para comparar los cambios en el torque excéntrico entre los cuatro grupos.

Volumen Máximo Adaptativo (MAV): se registrará el número de series o sesiones hasta alcanzar el pico adaptativo. Graficar los cambios en el CSA en función del volumen de entrenamiento para cada grupo. Identificar el punto donde las mejoras en la hipertrofia se estabilizan o decrecen ante aumentos de volumen. Este punto representa el MAV.

Los dos software que vamos a utilizar para el análisis de todos estos datos son:

SPSS: muy popular en ciencias de la salud y deporte, permite análisis descriptivos, inferenciales, ANOVA, regresiones y más.

Jamovi: software libre, intuitivo y basado en R, ideal para análisis descriptivos, pruebas de hipótesis y ANOVA. Es una alternativa moderna y fácil de usar a SPSS.

8. Equipo investigador

Para conducir esta investigación creemos que la forma más correcta de abordarlo sería desde el desarrollo de un equipo multidisciplinar con los siguientes perfiles profesionales que estarán en constante comunicación interprofesional:

- Graduado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte por cada grupo con un mínimo de 5 años de experiencia en el entrenamiento de fuerza que puedan ser capaces de diseñar el entrenamiento de forma segura y controlada.
- Un fisioterapeuta por cada grupo que pueda evaluar los cambios en la funcionalidad global del cuerpo: pre, durante y post entrenamiento.
- Un nutricionista deportivo por cada grupo que controle las variables dietéticas que podrían influir en los resultados, considerando que algunos estudios hacen referencia a adaptaciones bioquímicas y hormonales.

- Dos médicos deportivos que supervisen los aspectos relacionados con la salud de los sujetos del estudio y vayan a realizar las biopsias musculares adecuadamente, así como evaluar aspectos como los cambios en la arquitectura muscular y tendinosa que se menciona en el estudio..
- Dos investigadores con experiencia en diseño experimental y estadística aplicada al deporte.
- Dos expertos en instrumentación y tecnología para evaluaciones deportivas, que puedan manejar equipos como el dispositivo de bioimpedancia de frecuencia múltiple y la dinamometría isocinética.
- Dos analistas de datos para procesar la información recopilada mediante software especializado como SPSS (software de análisis estadístico) para garantizar el rigor científico del estudio.

9. Viabilidad del estudio

9.1. Viabilidad

En cuanto a la viabilidad del estudio, está principalmente respaldada por diversos factores económicos, metodológicos, técnicos y científicos que garantizan su correcta ejecución, los que vamos a analizar a continuación paso a paso:

- Principales estrategias de financiación:

Financiación principal: Caixa Impulse Innovación ayuda a transferir el conocimiento científico a la sociedad y fomenta la creación de productos, servicios y empresas relacionados con las ciencias de la vida: la ayuda económica se distribuirá a lo largo del programa, con una dotación específica que dependerá de la fase (50.000 € como máximo en la fase 1; 150.000 € como máximo en la fase 2; 500.000 € como máximo en la fase 3). Es acumulativa para los proyectos que pasen por diferentes fases.

Financiación secundaria: la convocatoria CSD para la creación y dinamización de Redes de Investigación en Ciencias del Deporte. Cada ayuda concedida tiene un límite máximo de 10.000 euros por red de investigación.

- Financiación para recursos humanos:

Programa INVESTIGO: orientado a la contratación de jóvenes investigadores en centros de investigación y universidades. Y contratos de técnicos especialistas a través de los fondos propios de la universidad o centro de investigación.

- Gastos fungibles y otros materiales:

Para garantizar la viabilidad completa del proyecto, es imprescindible elaborar un presupuesto detallado que contemple una partida presupuestaria general:

Personal: 60% del presupuesto total (becas, contratos, complementos salariales).

Equipamiento: 20% del presupuesto (adquisición y mantenimiento).

Movilidad y difusión: 15% (publicaciones).

Gastos generales: 5% (material fungible, servicios externos).

- Respaldo científico y metodológico:

El diseño experimental aleatorizado propuesto cuenta con un sólido respaldo científico basado en investigaciones previas sobre entrenamiento excéntrico. Los estudios de Hody et al. (2019) y Schoenfeld et al. (2017) han demostrado la relevancia del entrenamiento excéntrico para el aumento de la fuerza y masa muscular, proporcionando una base teórica sólida para nuestra investigación.

- Acceso a infraestructura y equipamiento:

El estudio es viable desde el punto de vista técnico dado que se realizará en la Universidad Europea de Madrid, donde se dispone del equipamiento necesario: máquinas isocinéticas capaces de trabajar a 180°/s, instrumentos de medición

como ultrasonografía, resonancia magnética y tomografía computarizada para evaluar el grosor muscular (CSA), así como equipos de electromiografía para medir la actividad muscular durante los entrenamientos.

- Muestra y diseño experimental

La formación de grupos experimentales (bajo volumen, volumen moderado, alto volumen y muy alto volumen) con 10 participantes por grupo es viable y está alineada con los tamaños muestrales utilizados en estudios similares. La población objetivo (estudiantes y empleados de la Universidad Europea de Madrid) es accesible, y los criterios de inclusión y exclusión están claramente definidos. El rango de edad (18-35 años) y la especificidad de la muestra (no entrenados, sin lesiones recientes) permiten controlar variables confusoras.

- Metodología de evaluación

La viabilidad metodológica está sustentada por el uso de técnicas validadas científicamente para evaluar los diferentes parámetros: biomarcadores y biopsias musculares para evaluar el daño muscular, cuestionarios de DOMS y tiempo de relajación mediante MRI para valorar la percepción subjetiva y objetiva del daño muscular, mediciones del grosor muscular mediante tecnologías avanzadas y análisis del ángulo de penetración antes y después de la intervención.

- Control de sesgos

El diseño incorpora medidas para controlar posibles sesgos: la persona que va a realizar este proceso de asignación de personas a cada grupo y que gestione el software de asignación aleatorizada a los grupos, va a ser ajena a esta investigación, por lo que no va haber capacidad de sesgar el proceso.

- Justificación y relevancia

La viabilidad también se sustenta en la justificación del estudio, que aborda aspectos de alta relevancia como la eficiencia metabólica del ejercicio excéntrico, prevención de sarcopenia, mejora del rendimiento deportivo, aplicaciones en rehabilitación y adaptaciones específicas como se menciona anteriormente.

9.2. Limitaciones

A continuación trataremos las principales limitaciones identificadas en el estudio, centrándonos únicamente en aquellos aspectos que escapan al control del equipo investigador y que no derivan de un planteamiento deficiente.

- Representatividad de la muestra

El estudio se realizará exclusivamente con adultos jóvenes (18-35 años), de etnia caucásica, estudiantes y empleados de la Universidad Europea de Madrid, y con estado físico no entrenado. Esta selección restringe la generalización de los resultados a otras poblaciones (perfiles geriátricos, niños, otras etnias, sujetos entrenados, etc.), ya que las adaptaciones al entrenamiento excéntrico pueden variar significativamente según la edad, antecedentes deportivos y factores genéticos.

- Tamaño muestral reducido

El tamaño de muestra es de 10 sujetos por grupo experimental. Aunque está alineado con estudios previos, un tamaño muestral pequeño puede limitar la potencia estadística y aumentar la probabilidad de errores tipo.

- Variabilidad biológica interindividual

Existen diferencias genéticas, hormonales y de respuesta al entrenamiento entre los sujetos, incluso dentro de una muestra homogénea. Estas diferencias pueden

influir en la magnitud de las adaptaciones musculares y en la respuesta a los diferentes volúmenes de entrenamiento, dificultando la interpretación de los resultados.

- Limitaciones éticas y procedimentales en las biopsias musculares

El protocolo contempla la obtención de biopsias musculares que son procedimientos invasivos que pueden generar rechazo entre los participantes, lo que podría afectar la tasa de retención y la calidad de la muestra biológica. Además, existen límites éticos y legales respecto al número y localización de biopsias que pueden realizarse.

- Control de variables externas

Aunque se contará con nutricionistas para controlar la dieta, no es posible asegurar el cumplimiento absoluto de las recomendaciones dietéticas ni controlar todos los factores externos (sueño, estrés, etc.) que pueden influir en la adaptación al entrenamiento.

- Duración limitada de la intervención y riesgo de abandono.

El estudio se desarrollará en un periodo concreto de 28 semanas por lo que esto puede aumentar el riesgo de que algunos sujetos no finalicen todo el protocolo. No pudiendo extrapolar los efectos a largo plazo del entrenamiento excéntrico ni la persistencia de las adaptaciones observadas.

10. Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

3. Salud y bienestar

El estudio aborda temas relacionados con la mejora de la salud física, la prevención de la sarcopenia, la rehabilitación y la optimización del rendimiento

deportivo, todos ellos alineados con el objetivo de garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos en todas las edades.

Y también, nuestro trabajo sobre el estudio del entrenamiento excéntrico isocinético tiene un impacto directo en la promoción de la salud física, la prevención de enfermedades y la mejora del bienestar general. Argumentado por:

El entrenamiento excéntrico ha demostrado ser eficiente para aumentar la fuerza y masa muscular, lo que contribuye a la prevención de la sarcopenia en adultos mayores, reduciendo así los riesgos asociados a la pérdida de masa muscular.

Tiene aplicaciones en la rehabilitación de lesiones musculoesqueléticas, principalmente en tendinopatías, ayudando a la recuperación funcional. Su eficiencia metabólica lo hace especialmente útil en poblaciones con tolerancia reducida al ejercicio, como personas mayores o con ciertas patologías, favoreciendo la inclusión en el acceso a programas de ejercicio. El conocimiento generado permite desarrollar protocolos de entrenamiento más efectivos y personalizados, optimizando el rendimiento deportivo y la salud pública.

Finalmente, creemos que el trabajo contribuye al ODS 3 porque busca generar conocimiento aplicable para mejorar la salud y el bienestar de la población a través de estrategias de ejercicio físico basadas en la evidencia científica.

11. Referencias bibliográficas

- Baz-Valle, E., Balsalobre-Fernández, C., Alix-Fages, C., & Santos-Concejero, J. (2022). A systematic review of the effects of different resistance training volumes on muscle hypertrophy. *Journal of Human Kinetics*, 81, 199-210. <https://doi.org/10.2478/hukin-2022-0017>
- Bernárdez-Vázquez, R., Raya-González, J., Castillo, D., & Beato, M. (2022). Resistance Training Variables for Optimization of Muscle Hypertrophy: An Umbrella Review. *Frontiers In Sports And Active Living*, 4. <https://doi.org/10.3389/fspor.2022.949021>
- Chapman, D. W., Newton, M., McGuigan, M., & Nosaka, K. (2008). Effect of Lengthening Contraction Velocity on Muscle Damage of the Elbow Flexors. *Medicine & Science In Sports & Exercise*, 40(5), 926-933. <https://doi.org/10.1249/mss.0b013e318168c82d>
- Clarkson, P. M., & Hubal, M. J. (2002). Exercise-Induced Muscle Damage in Humans. *American Journal Of Physical Medicine & Rehabilitation*, 81(Supplement), S52-S69. <https://doi.org/10.1097/00002060-200211001-00007>
- CSMi. (s.f.). *HUMAC NORM Isokinetic Machine*. HUMAC NORM. <https://humacnorm.com/humacnorm-isokinetic-machine/>
- Douglas, J., Pearson, S., Ross, A., & McGuigan, M. (2016). Chronic Adaptations to Eccentric Training: A Systematic Review. *Sports Medicine*, 47(5), 917-941. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0628-4>

- Franchi, M. V., Atherton, P. J., Reeves, N. D., Flück, M., Williams, J., Mitchell, W. K., Selby, A., Valls, R. M. B., & Narici, M. V. (2014). Architectural, functional and molecular responses to concentric and eccentric loading in human skeletal muscle. *Acta Physiologica*, 210(3), 642-654.
<https://doi.org/10.1111/apha.12225>
- Hody, S., Croisier, J., Bury, T., Rogister, B., & Leprince, P. (2019). Eccentric Muscle Contractions: Risks and Benefits. *Frontiers In Physiology*, 10.
<https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00536>
- Hortobagyi, T., Hill, J. P., Houmard, J. A., Fraser, D. D., Lambert, N. J., & Israel, R. G. (1996). Adaptive responses to muscle lengthening and shortening in humans. *Journal Of Applied Physiology*, 80(3), 765-772.
<https://doi.org/10.1152/jappl.1996.80.3.765>
- Kim, S. Y., Ko, J. B., Farthing, J. P., & Butcher, S. J. (2014). Investigation of supraspinatus muscle architecture following concentric and eccentric training. *Journal Of Science And Medicine In Sport*, 18(4), 378-382.
<https://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.05.007>
- Maeo, S., Shan, X., Otsuka, S., Kanehisa, H., & Kawakami, Y. (2018). Neuromuscular Adaptations to Work-matched Maximal Eccentric versus Concentric Training. *Medicine & Science In Sports & Exercise*, 50(8), 1629-1640. <https://doi.org/10.1249/mss.0000000000001611>
- Margaritelis, N. V., Theodorou, A. A., Baltzopoulos, V., Maganaris, C. N., Paschalis, V., Kyparos, A., & Nikolaidis, M. G. (2015). Muscle damage and

inflammation after eccentric exercise: can the repeated bout effect be removed? *Physiological Reports*, 3(12), e12648.
<https://doi.org/10.14814/phy2.12648>

Maroto-Izquierdo, S., Martín-Rivera, F., Nosaka, K., Beato, M., González-Gallego, J., & De Paz, J. A. (2023). Effects of submaximal and supramaximal accentuated eccentric loading on mass and function. *Frontiers In Physiology*, 14. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1176835>

Marzilger, K., Leger, H. R., & Schiffer, T. A. (2019). Effects of Lengthening Velocity During Eccentric Training on Vastus Lateralis Muscle Hypertrophy. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 33(7), 1761–1772.

Moore, D. R., Young, M., & Phillips, S. M. (2011). Similar increases in muscle size and strength in young men after training with maximal shortening or lengthening contractions when matched for total work. *European Journal Of Applied Physiology*, 112(4), 1587-1592.
<https://doi.org/10.1007/s00421-011-2078-x>

Paddon-Jones, D., Leveritt, M., Lonergan, A., & Abernethy, P. (2001). Adaptation to chronic eccentric exercise in humans: the influence of contraction velocity. *European Journal of Applied Physiology*, 85(5), 466–471.
<https://doi.org/10.1007/s004210100467>

Schoenfeld, B. J., Ogborn, D. I., Vigotsky, A. D., Franchi, M. V., & Krieger, J. W. (2017). Hypertrophic Effects of Concentric vs. Eccentric Muscle Actions: A Systematic Review and Meta-analysis. *The Journal Of Strength And*

Conditioning Research, 31(9), 2599-2608.

<https://doi.org/10.1519/jsc.0000000000001983>

Schoenfeld, B. J. (2016). *Science and development of muscle hypertrophy* (2nd ed.). Human Kinetics.

Seeger, J. Y., Arvidsson, B., Thorstensson, A., & Seeger, J. Y. (1998). Specific effects of eccentric and concentric training on muscle strength and morphology in humans. *European Journal Of Applied Physiology*, 79(1), 49-57.

<https://doi.org/10.1007/s004210050472>

Shepstone, T. N., Tang, J. E., Dallaire, S., Schuenke, M. D., Staron, R. S., & Phillips, S. M. (2005). Short-term high- vs. low-velocity isokinetic lengthening training results in greater hypertrophy of the elbow flexors in young men. *Journal of Applied Physiology*, 98(5), 1768–1776.

<https://doi.org/10.1152/japplphysiol.01027.2004>

12. Anexos

Anexo 9.1.

Figura 1.

Consentimiento informado para la realización de una biopsia.

Consentimiento informado para la realización de una biopsia

Datos del paciente:

Nombre y apellidos: _____

DNI/NIE/Pasaporte: _____

Fecha de nacimiento: _____

Domicilio: _____

Datos del procedimiento:

Tipo de biopsia: _____

Médico responsable: Dr./Dra. _____

Nº de colegiado: _____

1. Información sobre el procedimiento

Se me ha explicado que la biopsia consiste en la obtención de una muestra de tejido mediante punción, escisión o corte, con el objetivo de analizar posteriormente en el laboratorio. Esta muestra permitirá establecer un diagnóstico preciso de la lesión o enfermedad que padezco, y guiará el tratamiento más adecuado. Me han informado de la necesidad y conveniencia de realizar este procedimiento, así como de las posibles alternativas.

2. Riesgos y complicaciones

He sido informado/a de los riesgos y complicaciones que pueden derivarse de la biopsia, que pueden incluir, entre otros: dolor o molestias en la zona de la intervención, sangrado o hematoma, infección local, reacción alérgica a la anestesia (si se utiliza), otras complicaciones específicas según la localización de la biopsia. Entiendo que, aunque los profesionales pondrán todos los medios a su alcance para minimizar estos riesgos, pueden presentarse complicaciones imprevisibles.

3. Revocación del consentimiento

Me han explicado que puedo revocar este consentimiento en cualquier momento, antes de la realización del procedimiento, sin necesidad de justificar mi decisión y sin que ello suponga perjuicio para mi atención médica.

4. Uso de la muestra y protección de datos

He sido informado/a de que la muestra obtenida será utilizada exclusivamente para fines diagnósticos, salvo que autorice expresamente su uso en proyectos docentes o de investigación, y que mis datos personales serán tratados conforme a la legislación vigente en materia de protección de datos personales.

5. Declaración y autorización

Declaro que he recibido la información de forma clara y comprensible, he podido formular todas las preguntas que he considerado oportunas y me han sido resueltas satisfactoriamente. Entiendo el procedimiento, sus riesgos y alternativas, y doy mi consentimiento libre y voluntario para que se me realice la biopsia propuesta.

En _____, a ____ de _____ de _____

Firma del paciente: _____

Firma del médico: _____

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9.2.

Figura 2.

Consentimiento informado para participar en un estudio de investigación.

Consentimiento informado para participar en un estudio de investigación

Investigadores Principales: [Nombre de los investigadores]

Institución: [Nombre de la Universidad]

1. Introducción

Se le invita a participar en un estudio de investigación sobre los efectos del entrenamiento excéntrico isocinético en la hipertrofia muscular. Este documento le proporcionará la información necesaria para decidir si desea o no participar. Por favor, léalo cuidadosamente y haga las preguntas que considere necesarias antes de decidir.

2. Propósito del Estudio

El objetivo de este estudio es determinar el rango de volumen máximo adaptativo (MAV) en el entrenamiento excéntrico isocinético a 180°/s que induce las máximas adaptaciones de hipertrofia muscular en el cuádriceps.

3. Procedimientos del Estudio

Evaluación Inicial: Se realizarán mediciones iniciales de su grosor muscular (CSA), ángulo de penación del cuádriceps, actividad electromiográfica (EMG) y torque excéntrico e isométrico. Estas mediciones se realizan mediante resonancia magnética (MRI), ecografía musculoesquelética y dinamometría isocinética.

Será asignado aleatoriamente a uno de los cuatro grupos de entrenamiento:

Grupo de bajo volumen (8 series efectivas por sesión)

Grupo de volumen moderado (16 series efectivas por sesión)

Grupo de alto volumen (20 series efectivas por sesión)

Grupo de muy alto volumen (25 series efectivas por sesión)

El entrenamiento consistirá en ejercicios excéntricos en una máquina isocinética a una velocidad de 180°/s. La duración del programa de entrenamiento será de 26 semanas. Se realizarán evaluaciones periódicas a lo largo del estudio para medir su progreso y adaptación al entrenamiento. Estas evaluaciones incluirán las mismas mediciones que se realizaron en la evaluación inicial.

Completará cuestionarios sobre dolor muscular de aparición tardía para evaluar su percepción del dolor muscular después de las sesiones de entrenamiento.

Se le podrá pedir que participe en la toma de biopsias musculares en la unión miotendinosa y a mitad del vientre muscular para valorar el daño muscular y la adaptación al mismo.

4. Confidencialidad

Toda la información recopilada durante este estudio será estrictamente confidencial y se utilizará únicamente con fines de investigación. Sus datos personales serán codificados y almacenados de forma segura, y no se revelarán a terceros sin su consentimiento explícito.

5. Participación Voluntaria y Derecho a Retirarse

Su participación en este estudio es completamente voluntaria. Tiene derecho a negarse a participar o a retirarse del estudio en cualquier momento, sin que esto afecte su relación con los investigadores.

6. Consentimiento

He leído y comprendido la información proporcionada en este documento. He tenido la oportunidad de hacer preguntas y he recibido respuestas satisfactorias. Doy mi consentimiento voluntario para participar en este estudio de investigación.

Nombre y apellidos: _____

Firma del Participante: _____

Firma del Investigador: _____

Fecha: _____

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9.3.

Figura 3.

Consentimiento para el uso de imágenes y/o grabaciones audiovisuales.

Consentimiento para el uso de imágenes y/o grabaciones audiovisuales

1. Propósito de este Consentimiento

Este documento tiene como objetivo informarle sobre el uso que se hará de las imágenes y/o grabaciones audiovisuales que se puedan obtener durante su participación en el estudio mencionado anteriormente. Su firma al final de este documento indica que comprende y acepta el uso de estos materiales según se describe a continuación.

2. Recogida de Imágenes y Grabaciones

Durante su participación en el estudio, es posible que se le grabe en vídeo o se le tomen fotografías mientras realiza las sesiones de entrenamiento excéntrico isocinético y durante las evaluaciones (mediciones del CSA, ángulo de penetración, EMG, etc.). También es posible que se realicen grabaciones de audio durante las entrevistas o evaluaciones.

3. Propósito del Uso de Imágenes y Grabaciones

Para analizar la técnica y la biomecánica de los ejercicios excéntricos.
Documentación del estudio para documentar el progreso y los resultados.
Para incluir imágenes y/o vídeos en artículos científicos que se publiquen.
Para utilizar las imágenes y/o vídeos como material educativo en cursos y talleres.
Con fines de divulgación de los resultados del estudio en medios de comunicación

4. Confidencialidad y Anonimato

Nos comprometemos a proteger su privacidad y confidencialidad. En la medida de lo posible, las imágenes y grabaciones se utilizarán de forma que no se le pueda identificar fácilmente. Si se utilizan imágenes en las que se le pueda reconocer, se solicitará su consentimiento específico para cada uso.

5. Almacenamiento y Conservación

Las imágenes y grabaciones se almacenarán de forma segura y confidencial, y solo tendrán acceso a ellas los miembros del equipo de investigación autorizados. Los materiales se conservarán durante el tiempo estrictamente necesario para cumplir con los fines indicados anteriormente, y se eliminarán de forma segura una vez que ya no sean necesarios.

6. Sus Derechos

- Negarse a ser grabado o fotografiado.
- Su participación no se verá afectada si no desea este consentimiento.
- Revocar este consentimiento en cualquier momento.
- Solicitar ver las imágenes y grabaciones en las que aparece.
- Solicitar que se eliminen sus imágenes y grabaciones de la base de datos.

7. Consentimiento

He leído y comprendido la información proporcionada en este documento. He tenido la oportunidad de hacer preguntas y he recibido respuestas satisfactorias. Doy mi consentimiento voluntario para que se utilicen mis imágenes y/o grabaciones audiovisuales según se describe en este documento.

☐ Acepto que se utilicen mis imágenes y grabaciones para los fines indicados.

☐ No acepto que se utilicen mis imágenes y grabaciones.

Nombre y apellidos: _____

Firma del Participante: _____

Firma del Investigador: _____

Fecha: _____

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9.4.

Tabla 1.

Variables, tipos, instrumentos y aplicación.

VARIABLE Y TIPO	INSTRUMENTO	APLICACIÓN
CSA del cuádriceps (cuantitativa continua)	Resonancia Magnética (MRI) Siemens Magnetom Prisma 3T	Se toman imágenes axiales del muslo a nivel del vientre medio del cuádriceps.
Creatina Kinasa - CK (cuantitativa continua)	Ensayo ELISA	Medición de la concentración en suero sanguíneo
Proteína C Reactiva - PCR (cuantitativa continua)	Inmunoturbidimetría o ELISA	Medición de la concentración en suero sanguíneo
Mioglobina (cuantitativa continua)	Quimioluminiscencia o ELISA	Medición de la concentración en suero sanguíneo
Ángulo de penetración del cuádriceps (cuantitativa continua)	Ecografía musculoesquelética Esaote MyLab 70 XVision	Se mide el ángulo formado entre las fibras musculares y la aponeurosis profunda con el participante en reposo
Actividad electromiográfica - EMG del cuádriceps (cuantitativa continua)	Electromiógrafo de superficie Delsys Trigno Wireless System	Se colocan electrodos en los músculos del cuádriceps y se registra la actividad durante las contracciones excéntricas

Torque excéntrico del cuádriceps (cuantitativa continua)	Dinamómetro isocinético Cybex Norm	Se registra el pico de torque generado durante las contracciones excéntricas a 180°/s
Volumen Máximo Adaptativo - MAV (cuantitativa discreta)	Cálculo derivado de la progresión de volumen vs adaptación	Se analiza a partir del punto donde las mejoras de hipertrofia se estabilizan o decrecen ante aumentos de volumen

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9.5.

Tabla 2.

Materiales, empresa / marca y descripción.

MATERIAL	EMPRESA / MARCA	DESCRIPCIÓN
Resonancia Magnética (MRI)	Siemens Magnetom Prisma 3T	Equipo de alto campo para obtener imágenes axiales del muslo y medir el área de sección transversal (CSA).
Ecógrafo musculoesquelético	Esaote MyLab 70 XVision	Sistema de ultrasonido para medir el ángulo de penación y grosor muscular del cuádriceps.
Electromiógrafo de superficie	Delsys Trigno Wireless System	Sistema inalámbrico para registrar la actividad electromiográfica (EMG) del cuádriceps durante el ejercicio.
Dinamómetro isocinético	Cybex Norm	Máquina computarizada para medir el torque excéntrico del cuádriceps a 180°/s.

Máquina de extensión de cuádriceps isocinética	Cybex Norm	Utilizada para realizar el ejercicio principal del estudio (extensión unilateral a 180°/s).
Kits de ensayo ELISA	No especificado (estándar de laboratorio)	Kits para cuantificar creatina kinasa (CK), proteína C reactiva (PCR) y mioglobina en suero sanguíneo.
Software de análisis de imágenes MRI	Siemens Syngo	Plataforma para segmentación y análisis del área muscular en las imágenes obtenidas por resonancia magnética.
Software de análisis EMG	Delsys (EMG Works)	Programa para el procesamiento y análisis de la señal electromiográfica.
Electrodos EMG	Delsys	Electrodos de superficie para registrar la actividad eléctrica muscular.

Camilla de exploración	No especificado	Superficie para posicionar al participante durante las pruebas de imagen y mediciones.
------------------------	-----------------	--

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9.6.

Tabla 3.

Medición de variables en el estudio.

VARIABLE	MEDICIÓN DENTRO DEL ESTUDIO
Área de sección transversal (CSA) del cuádriceps	Se realizará una resonancia magnética (Siemens Magnetom Prisma 3T) antes y después de la intervención. El participante estará en posición supina y relajado. Se tomarán imágenes axiales del muslo a nivel del vientre medio del cuádriceps (por ejemplo, al 50% y 70% de la longitud del fémur). El área se calculará usando el software de análisis de imagen.
Creatina Kinasa (CK), Proteína C Reactiva (PCR) y Mioglobina	Se tomarán muestras de sangre venosa antes y después de la intervención (y, si procede, en puntos intermedios). Las concentraciones de CK, PCR y mioglobina se analizarán mediante ensayos ELISA o inmunoturbidimetría en laboratorio.
Ángulo de penetración del cuádriceps	Se utilizará un ecógrafo musculoesquelético (Esaote MyLab 70 XVision). El participante estará en reposo y se medirá el ángulo entre las fibras musculares y la aponeurosis profunda en el vasto lateral, en varios puntos, promediando los resultados.
Actividad electromiográfica	Se colocarán electrodos de superficie (Delsys Trigno Wireless System) sobre el vasto lateral, recto femoral y

(EMG) del cuádriceps	vasto medial. Durante la ejecución de series submáximas de extensión de cuádriceps a 180°/s en la máquina isocinética, se registrará la señal EMG y se analizarán los datos para evaluar la activación muscular.
Torque excéntrico del cuádriceps	En la máquina isocinética Cybex Norm, tras un protocolo de familiarización, se medirá el pico de torque generado durante las contracciones excéntricas a 180°/s. Se registran los valores antes y después de la intervención.
Volumen Máximo Adaptativo (MAV)	Se calculará a partir del número de series o sesiones realizadas hasta que las mejoras en la hipertrofia (CSA) se estabilicen o decrece, comparando los resultados entre los diferentes grupos de volumen (bajo, moderado, alto, muy alto).

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9.7.

Tabla 4.

Cronograma.

SEMANA	ACTIVIDAD	RESPONSABLES	OBSERVACIONES
-4	Reunión inicial, revisión y ajuste del protocolo, asignación de roles	Investigadores en diseño experimental y estadística, equipo completo	Protocolo final, roles definidos
-3	Preparación de materiales, consentimientos, cuestionarios	Expertos en instrumentación, analistas de datos	Documentación lista
-2	Capacitación en uso de equipos y protocolos	Expertos en instrumentación, graduados en CAFYD	Manual de procedimientos
-1	Calibración de equipos, pruebas piloto	Biomecánicos, instrumentación	Informe de calibración
-3 a -1	Reclutamiento y entrevistas iniciales	CAFYD, médicos deportivos	Base de datos de candidatos

-1	Evaluación médica y selección final de participantes	Médicos deportivos, fisioterapeutas	Lista definitiva de sujetos (40)
1	Evaluaciones basales: antropometría, composición corporal, funcionalidad, movimiento	Nutricionistas, fisioterapeutas, biomecánicos	Registro de datos basales
2	Biopsias musculares iniciales, MRI inicial, fuerza inicial (torque)	Médicos deportivos, instrumentación, CAFYD, biomecánicos	Base de datos completa inicial
3	Familiarización: entrenamiento a 60°/s	CAFYD (uno por grupo), fisioterapeutas	Registro de adaptación inicial
4	Familiarización: progresión a 100°/s	CAFYD, fisioterapeutas	Seguimiento semanal
5-8	Familiarización:	CAFYD,	Registro de

	incremento de 20°/s semanal hasta 180°/s	fisioterapeutas, biomecánicos	adaptación semanal
9-10	Inicio intervención: aplicación de volumenes base (GBV: 7, GMV: 12, GAV: 17, GMAV: 22 series)	CAFYD (uno por grupo), fisioterapeutas, biomecánicos	Registro de sesiones
11-18	Intervención: progresión de volumen (añadir 1 serie cada 2 semanas)	CAFYD, fisioterapeutas, biomecánicos	Informes bisemanales
19-28	Intervención: mantenimiento del volumen máximo alcanzado	CAFYD, fisioterapeutas, biomecánicos	Registro de adherencia y progresión
9-28	Control nutricional y dietético semanal	Nutricionistas deportivos	Registro semanal

9-28	Evaluación semanal de daño muscular y DOMS	Fisioterapeutas, médicos deportivos	Registro semanal
16, 22	Evaluaciones intermedias de CSA por MRI	Instrumentación, médicos deportivos	Informes de progresión
29	Evaluaciones finales: biopsias, MRI, fuerza final	Médicos deportivos, instrumentación, CAFYD, biomecánicos	Base de datos final
29-30	Análisis de datos y estadística	Analistas de datos, investigadores en diseño experimental	Informe preliminar
31	Redacción del informe final y preparación de publicaciones	Investigadores en diseño experimental, equipo completo	Borrador de artículo científico
32	Presentación de resultados y preparación de	Investigadores en diseño experimental, equipo completo	Presentación y abstract para congresos

	comunicaciones para congresos		
--	----------------------------------	--	--

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 9.8.

Figura 4.

Máquina isocinética.



Nota. Adaptado de *HUMAC NORM Isokinetic Machine*, por CSMi, s.f., *HUMAC NORM*, <https://humacnorm.com/humacnorm-isokinetic-machine/>