

UNIVERSIDAD DE LEÓN

INSTITUTO DE BIOMEDICINA

*Doctorado en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte*



universidad  
de león

**EFFECTOS DEL ENTRENAMIENTO ACENTUADO  
EXCÉNTRICAMENTE SOBRE LA FUERZA, LA POTENCIA Y LA  
MASA MUSCULAR DE LOS MIEMBROS IPSILATERALES NO  
ENTRENADOS EN JÓVENES FÍSICAMENTE ACTIVOS**

**Ipsilateral Lower-to-Upper Limb Cross-Transfer Effect on Muscle Strength,  
Mechanical Power, and Lean Tissue Mass after Accentuated Eccentric Loading**

Memoria presentada por **MAGDI RASHAD HASHISH** para la obtención del título de **DOCTOR**  
en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte.

DIRECTORES:

**Prof. Dr. José Antonio De Paz Fernández**

**PROF. DR. Sergio Maroto Izquierdo.**

**LEÓN 2022.**

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer enormemente al Dr. José Antonio de Paz Fernández, mi primer director de tesis, por permitirme ser parte de su grupo de estudiantes en el reconocido Instituto de Biomedicina de la Universidad de León. Además, agradecerle por compartir sus valiosos conocimientos y brindar los apoyos de su alcance que hicieron posible este proyecto.

Mi enorme agradecimiento también a mi segundo director de tesis Dr. Sergio Maroto Izquierdo, por su apoyo incondicional y el seguimiento constante, sus valiosos consejos y por compartir conmigo sus valiosos conocimientos.

Agradezco también a mis colegas de formación con quienes compartí esta experiencia académica en el seminario 85, en particular Saúl Manzano por su ayuda durante el proceso y la preparación del proyecto de investigación y la recogida de datos de la presente tesis.

Agradezco también todos los estudiantes que tomaron parte de este proyecto y por su compromiso y dedicación.

Quiero agradecer de manera muy especial a todas las personas, que por fuera del ámbito académico, fueron un apoyo para seguir adelante, brindarme todo tipo de apoyo y animarme siempre a conseguir mis metas, en particular agradezco a Alexis Cabrales Suárez y sus hermanos Antonio, Tino y Mari.

Agradezco también a mis amigos de León Jesús y Jesús, Frenando, Carlos, Begoña, y Bernardo.

Agradezco también a mis amigos en particular a Stefano Dassiè y su familia, a Piccinini Marzia, Y su hija Erika, a David y sus hijas Sara y Clara, y a Mila, también a mis amigos Soufian Maiden y su hermano Wasim, a la doctora Manuela Alemán, a Sonia, a Nélida, a Mati y Leti y el pequeño Néstor.

*Dedico este manuscrito a mis padres que iniciaron este camino conmigo sin poder terminarlo por la pandemia del COVID-19.*

*NEVER DEGRADE A SNAKE BECAUSE IT HAS NO NAILS. ONE DAY, IT COULD BECOME A  
DRAGON.*

*Japanese Proverb*

## **PUBLICACIONES**

### **ARTÍCULOS ORIGINALES EN REVISTAS CIENTÍFICAS:**

Magdi HR, Maroto-Izquierdo S, de Paz JA. Ipsilateral Lower-to-Upper Limb Cross-Transfer Effect on Muscle Strength, Mechanical Power, and Lean Tissue Mass after Accentuated Eccentric Loading. *Medicina (Kaunas)*. 2021 May 4; 57(5):445. Doi: 10.3390/medicina57050445. PMID: 34064370; PMCID: PMC8147780.

### **COMUNICACIONES PRESENTADAS EN CONGRESOS NACIONALES E INTERNACIONALES:**

COMUNICACIÓN 1: (2020). Effects of unilateral accentuated eccentric isoinertial resistance training on muscle mass and function of the trained and non-trained contralateral legs. 25th European College of Sport Science (ECSS) Congress. Sevilla, Andalucía, España.

COMUNICACIÓN 2: (2019). Functional and Structural effects of submaximal and supramaximal loads during eccentric-overload resistance training in the trained and contralateral legs. 24th European College of Sport Science (ECSS) Congress. Praga, República Checa.

COMUNICACIÓN 3: (2018). Effects of Unilateral Accentuated Eccentric Iso-inertial Resistance Training on Muscle Mass and Function of the Trained and Untrained Legs. 11th International Conference of Strength Training. Edith Cowan University. Perth, Australia.

## ABREVIATURAS

‰: Porcentaje.

1-RM: una repetición máxima, medida de la Fuerza Máxima Concéntrica

ACSM: American College of Sports Medicine

ADN: ácido desoxirribonucleico

AEL: Carga Excéntrica Acentuada.

ARN: ácido ribonucleico

ATP: Adenosín Trifosfato.

C.F.T: Curva Fuerza Tiempo.

C.F.V: Curva Fuerza Velocidad.

CEA: Ciclo de Estiramiento – Acortamiento.

CMJ: salto en contra movimiento.

CON: Ejercicio Concentrico.

CSA: Cross-Sectional Area, Área de Sección transversal (en Inglés)

D: Distancia.

DME: Dispositivo Motor Eléctrico.

DOMS: Dolor muscular tardío (en Inglés)

DXA: Densitometría dual de rayos X

EC: Educación Cruzada

ECC: Ejercicio excéntrico

EF: Ejercicio de Fuerza

EF: Entrenamiento de fuerza

Ej.: Ejemplo

EMG: Electromiografía

ES: El tamaño del efecto

F: Fuerza

FMAX: Pico Máximo de fuerza

H: Hombres

HZ: Hercios

IPAQ: Registro de actividad física (en Inglés)  
ISO: Isométrico  
J: Julios  
Kg: Kilogramo  
m: Metro  
M: Mujeres  
MI: Corteza motora primaria  
MNS: Sistema de Neuronas Espejo (en Inglés)  
MRI: Imagen de resonancia magnética (en Inglés)  
MVC: *contracción máxima*  
MVIC: Fuerza Máxima Isométrica  
N: Neuton  
NSCA: National Strength& conditioning Association  
NTA: Brazo no Entrenado  
OMS: Organización Mundial de La Salud  
PHL: Potencia media de cargas altas  
PLL: Potencia media de cargas bajas  
PML: potencia media de cargas media  
POST: después  
PRE: Antes  
RDF: Ratio de desarrollo de fuerza (en Inglés)  
ROM: Rango de movimiento (en Inglés)  
RT: Entrenamiento de resistencia (en Inglés)  
RT: Entrenamiento de resistencia (en Inglés)  
SCMD: Diferencia de medidas estandarizadas de cambio  
SD: división estándar  
SDdiff: Desviación estándar  
SNC: Sistema nervioso central  
T: Trabajo

TL: Pierna Entrenada

TLTM: Masa total del tejido magro

TMS: Estimulación magnética transcraneal (en Inglés)

UM: unidad motora

UMs: Unidades motoras

Vo<sub>2</sub> max: El consumo max de oxígeno

Vo<sub>2</sub>: consumo de oxígeno

# ÍNDICE

<b>1. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO.</b>	1
<b>2. INTRODUCCIÓN.</b>	13
2.1. EL SISTEMA NEURO MUSCULAR.	13
2.2. ¿CONTRACCIONES O ACCIONES MUSCULARES?	15
2.3. TIPOS DE ACCIONES MUSCULARES.	16
2.4. EL CONCEPTO DE LA FUERZA.	18
2.5. TIPOS DE TENSIÓN MUSCULAR	21
2.6. LA FUERZA Y SUS MANIFESTACIONES.	25
2.6.1. MANIFESTACIÓN ISOMÉTRICA.	26
2.6.2. MANIFESTACIÓN DINÁMICA	27
2.6.3. MANIFESTACIÓN REACTIVA	28
2.7. RELACIÓN MÚSCULO/FUERZA ENTRE GÉNEROS	29
2.8. MÉTODOS DEL ENTRENAMIENTO DE FUERZA	32
2.8.1. EJERCICIO CON EL PROPIO PESO CORPORAL.	33
2.8.2. ENTRENAMIENTO CON PESO LIBRE.	34
2.8.3. LEVANTAMIENTOS OLÍMPICOS.	35
2.8.4. ENTRENAMIENTO DE FUERZA VARIABLE: ELÁSTICOS.	35
2.8.5. ENTRENAMIENTO PLIOMÉTRICO.	36
2.8.6. ENTRENAMIENTO EXCÉNTRICO.	36
2.9. COMPONENTES DE LA CARGA DEL ENTRENAMIENTO DE FUERZA	38
2.9.1. LA INTENSIDAD DE ENTRENAMIENTO	38
2.9.2. EL VOLUMEN DE ENTRENAMIENTO	40
2.9.3. LA DENSIDAD DE ENTRENAMIENTO	43
2.9.4. LA VELOCIDAD DE EJECUCIÓN	45
2.10. LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS DEL ENTRENAMIENTO DE FUERZA	47
<b>3. EJERCICIO EXCÉNTRICO: ORIGEN, BASES Y CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS.</b>	50
3.1. CARACTERÍSTICAS DIFERENCIALES DE LAS ACCIONES EXCÉNTRICAS RESPECTO DE LA CONCÉNTRICAS	56
3.2. LIMITACIONES DEL EJERCICIO EXCÉNTRICO	66
<b>4. ENTRENAMIENTO DE FUERZA ACENTUADO EXCÉNTRICAMENTE</b>	68
<b>5. ENTRENAMIENTO DE FUERZA UNILATERAL: UN NUEVO PARADIGMA EN LA PRESCRIPCIÓN DEL EJERCICIO DE FUERZA EN CONTEXTOS CLÍNICOS Y DEPORTIVOS</b>	72
5.1. EL EFECTO CRUZADO	74
5.2. POSIBLES MECANISMOS FISIOLÓGICOS INVOLUCRADOS EN EL EFECTO CRUZADO	77
5.2.1. MECANISMOS MUSCULARES	79
5.2.2. MECANISMOS NEURALES	81
5.2.2.1. MECANISMOS DE LA MÉDULA ESPINAL	82
5.2.2.2. MECANISMOS CORTICALES	83
5.2.2.3. MECANISMOS SUBCORTICALES.	86
5.3. LA IMPORTANCIA DEL EFECTO CRUZADO EN CONTEXTOS CLÍNICOS Y DEPORTIVOS	87
5.4. EVIDENCIA DE EFECTO CRUZADO EN MIEMBROS HÉTEROLOGOS: EFECTOS DEL ENTRENAMIENTO IPSILATERAL	89
<b>6. OBJETIVOS.</b>	92
<b>7. METODOLOGÍA.</b>	93
7.1. DISEÑO GENERAL	93
7.2. SUJETOS.	94
7.3. ANÁLISIS DE ABSORCIOMETRÍA DE RAYOS X DE ENERGÍA DUAL (DXA)	95
7.4. FUERZA DINÁMICA MÁXIMA UNILATERAL (1-RM)	95
7.5. CONTRACCIÓN ISOMÉTRICA VOLUNTARIA MÁXIMA UNILATERAL	96
7.6. POTENCIA MUSCULAR UNILATERAL A DIFERENTES INTENSIDADES	97
7.8. PROGRAMA DE ENTRENAMIENTO	98
7.9. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	100
<b>8. RESULTADOS.</b>	103
<b>9. DISCUSIÓN.</b>	107
<b>10. CONCLUSIONES.</b>	114
<b>11. REFERENCIAS.</b>	116

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA.1. Esquema de la organización interna del sistema miotendinoso y del contenido de fibras musculares	14
FIGURA.2. Tipos de acción musculares ejemplificados en el salto vertical.	18
FIGURA.3. Ejemplo de una acción Isométrica Máxima.	22
FIGURA 4. Ejemplo de una acción dinámica concéntrica explosiva, (Squat Jump).	23
FIGURA.5. Ejemplo de una acción dinámica concéntrica, (Countermovement Jump Test)	24
FIGURA.6. Ejemplo de una acción dinámica concéntrica de carácter reactivo-explosivo Máxima (Drop Jump).	25
FIGURA.7. Entrenamiento excéntrico crónico y sus adaptaciones significativos.	55
FIGURA.8. Curva velocidad-Fuerza a diferentes niveles de activación muscular	58
FIGURA 9. Gráfica relación fuerza –coste metabólica, comparando la contracción concéntrica con la excéntrica.	63
FIGURA.10. Florest plot que muestra la diferencia en las diferencias medias estandarizadas entre y mujeres en la pierna de entrenamiento (TL) y en el brazo no entrenado (NTA)	106

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Potencial teórico de los diferentes métodos de entrenamiento de fuerza	37
Tabla 2: Cambios entre el grupo de entrenamiento del grupo de control, antes y después del entrenamiento en Hombres (H)	104
Tabla 3: Cambios entre el grupo de entrenamiento del grupo de control, antes y después del entrenamiento en Mujeres (M)	105

## 1. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

La Organización Mundial de la Salud (OMS) y las principales organizaciones profesionales y científicas en materia de salud, como el Colegio Americano de Medicina del Deporte o la Asociación Americana del Corazón, han venido elaborando recomendaciones para la población mundial en materia de ejercicio físico. Las iniciales recomendaciones eran que todas las personas realizaran 30 minutos de ejercicio aeróbico de moderada intensidad 5 días a la semana, para lograr una mejora en la calidad de vida y el estado de salud de las personas (Brooks, et al., 2004; Ramírez Varela et al., 2016). Durante mucho tiempo otras cualidades físicas relacionadas con la salud, como la fuerza y resistencia fuerza muscular o la flexibilidad, la velocidad, la agilidad, el equilibrio, o la coordinación, no eran recomendadas de manera expresa. Desde los años 90s el constante aumento de evidencia científica sobre los beneficios del entrenamiento neuromuscular, ha hecho que el entrenamiento de fuerza se consolide cada día más como el tipo de ejercicio muy importante, y que el desarrollo de la fuerza muscular se proponga como una herramienta eficaz para prevenir enfermedades y mantener un óptimo estado de salud. Otorgando, así, la importancia que tiene el tejido musculo esquelético en el funcionamiento del cuerpo humano. Por eso, en las últimas recomendaciones realizadas por la (OMS) en materia de ejercicio físico para las poblaciones mundiales publicadas en 2020 (<https://www.who.int/es/publications/i/item/9789240014886>), incorporan la necesidad de realizar ejercicio aeróbico, de fuerza, de flexibilidad y de coordinación neuromuscular, además de evitar comportamientos sedentarios.

Kraemer y colaboradores, en su estudio “Understanding the Science of Resistance Training: An Evolutionary Perspective” (Kraemer, et al., 2017) han demostrado que el entrenamiento de fuerza es el tipo de ejercicio que se relaciona con un mayor número de beneficios potenciales para un amplio espectro poblacional. Lo que ha implicado que las actividades que permiten mantener o incrementar la fuerza muscular adquieran una mayor relevancia en la promoción y mantenimiento

de la salud, además de la independencia física especialmente en determinadas poblaciones especiales (Haskell et al., 2007). Hoy en día, sabemos que el entrenamiento sistemático de la fuerza promueve cambios a estructurales, neuroendocrinos y funcionales, tanto en el sistema nervioso como en el sistema osteomuscular. A nivel neural, sabemos que el entrenamiento de fuerza causa una mejora en la velocidad de transmisión del impulso motor (Aagaard, 2003), un mayor reclutamiento de unidades motoras (Duchateau, et al., 2006) lo que se traduce en una mayor amplitud y densidad electromiográfica (Hakkinen, et al., 1985a). Cambios que explican en parte una mayor generación de tensión muscular y de velocidad en su producción. Desde la perspectiva arquitectónica, el potencial del entrenamiento de fuerza se relaciona con el desarrollo de la masa muscular (Schoenfeld, 2010). Pero, no solo estimula la hipertrofia muscular, sino también se observan cambios en la longitud del fascículo y en el ángulo de penación (Blazevich et al., 2017), lo que favorece una mayor producción de fuerza; además de promover la transferencia de las fibras musculares de tipo IIa hacia las fibras rápidas de tipo (IIX) (Green et al., 1999). También, el entrenamiento de fuerza ha demostrado generar una mayor rigidez miotendinosa (Douglas et al., 2017) y una mayor densidad mineral ósea (Barry y Kohrt, 2008). Desde el punto de vista neuroendocrino, el entrenamiento de fuerza favorece la existencia de un ambiente sistémico anabólico (Kraemer, et al., 2017), la liberación de catecolaminas (Guezennec et al., 1986) y una mayor actividad glucolítica (Tesch et al., 1990). Por último, desde el punto de vista de la capacidad funcional, el entrenamiento neuromuscular mejora la fuerza máxima y la rapidez en el desarrollo de la misma (en Inglés, rate of force development, RFD) (Suchomel et al., 2018), y también mayor rapidez en la producción de la potencia mecánica muscular (Suchomel et al., 2018).

El entrenamiento de fuerza también suele producir mejoras en el rendimiento de habilidades específicas del deporte (como por ejemplo, el salto vertical, la velocidad de sprint y/o el cambio de dirección) (Suchomel et al., 2018). Del mismo modo, tiene un efecto potenciador cuando se incluyen actividades de acondicionamiento en el calentamiento (Blazevich y Babault, 2019) y se relaciona con

la prevención de lesiones. Por lo tanto, el entrenamiento de fuerza es útil para mantener o recuperar la salud y la funcionalidad, la calidad de vida, y como es sabido el entrenamiento de fuerza también es básico en el ámbito del entrenamiento y el rendimiento (Kraemer y Ratamess, 2004). Por todo ello, hoy en día se ha incrementado el número de personas que participan en diferentes programas de entrenamiento de fuerza realizados en instalaciones deportivas de distinta índole, ya sea para aumentar su fuerza muscular con fines deportivos, para mejorar su salud, o para mejorar su aspecto físico a través de cambios en su composición corporal inducidos por estos programas de ejercicio.

La valoración de la fuerza muscular y de la potencia mecánica, ha sido y es una parte fundamental tanto para el conocimiento de la fisiología humana, para la valoración análisis del rendimiento competitivo y para la prescripción individualizada de las cargas de entrenamiento (ACSM - Kraemer et al., 2002). Los investigadores en Ciencias del Deporte, han buscado determinar perfiles de fuerza-velocidad que permitan identificar, no solo la intensidad óptima para desarrollar una determinada capacidad (por ejemplo, la potencia mecánica), si no también otras adaptaciones estructurales como al aumento de la sección transversal del músculo o neurofuncionales como es la coordinación neuromuscular (Loren, 2008). Así, sabemos que para lograr desarrollar la masa muscular se suelen recomendar cargas medio-altas que se posicionan entre el 67-80% de 1 repetición máxima (1RM), con las que se realiza el máximo, o casi máximo, número de repeticiones por serie posible. Mientras que para la mejora de la fuerza máxima, se aconseja la aplicación de cargas altas, iguales o superiores al 85% de 1RM. No obstante, tanto la activación y mejora de la función neuromuscular, como los cambios estructurales, parecen depender también, y en gran medida, de la intencionalidad del sujeto para alcanzar la máxima producción de fuerza en la unidad de tiempo en la que se desarrolla una determinada acción muscular, independientemente de la intensidad que se prescriba (González-Badillo, 2002; Behm y Sale, 1993).

No obstante, antes de proponerse programar un entrenamiento de fuerza, es necesario tener claros algunos conceptos básicos relacionados con las manifestaciones de la fuerza y su nomenclatura. Estos conocimientos, deben ser el punto de partida para programar el entrenamiento y para saber qué, cómo, cuándo y para qué medir para así analizar y conocer los efectos de su implementación. Desde un punto de vista biomecánico, la medición y valoración de la manifestación de la tensión muscular generada, requiere evaluar y conocer la masa movilizada, en este contexto denominada fuerza, (expresada kilogramos-fuerza- masa movilizada, (Kg) o en la unidad de fuerza del Sistema Internacional de Medida, Newtons (N)). Idealmente se debería cuantificar no sólo la masa movilizada (resistencia), sino la distancia que es movilizada, y el tiempo empleado para su movilización a tanto el promedio de todo el rango de movimiento sino durante pequeñas fracciones de tiempo mientras se produce en este rango el movimiento, y así registrar la relación fuerza/tiempo (F-T) lo que nos permitirá conocer el pico de fuerza a lo rango del movimiento, más allá de la fuerza promedio del desplazamiento, y la evolución de la fuerza manifestada en base a la velocidad de movimiento de la carga (curva fuerza-velocidad, F-V). Del producto de la tensión aplicada para desplazar una resistencia, y de la velocidad a la que se desplaza dicha resistencia surge el concepto de potencia muscular, que podemos registrar a lo largo del rango de movimiento, lo que conocemos que curva de potencia, que se deriva directamente de la curva F-V y evoluciona de manera paralela a ella y a la curva F-T (González-Badillo y Gorostiaga, 2002). Dando lugar a cada una de los tipos de fuerza y sus manifestaciones en función del punto de la curva en el que se produzca una determinada acción muscular. Así, por ejemplo, aquellas acciones en las que se produce una elevada cantidad de fuerza y la carga es movilizada a baja velocidad se relacionan, con la fuerza máxima dinámica, mientras que las acciones de carácter explosivo en las que se produce una menor cantidad de fuerza pero la resistencia es movilizada a una elevada velocidad, se denominan fuerza elástica-explosiva.

La carga de entrenamiento viene determinada por diversos factores más allá de la magnitud de la masa movilizada. Los componentes básicos clásicos que

determinan carga de entrenamiento son la intensidad (masa de la resistencia), el volumen (masa total movilizada), la velocidad a la que se mueve la carga y la densidad (relación entre el tiempo de trabajo y el tiempo de descanso).

Los diferentes objetivos de entrenamiento se relacionan de manera directa con la intensidad de ejercicio. Y del mismo modo, la intensidad se relaciona de manera inversamente proporcional con el volumen y la densidad de entrenamiento. Además, no debemos olvidarnos de otros componentes de la carga de entrenamiento también importantes, como son el orden y la selección de ejercicios.

La carga de entrenamiento incluye no solo el diseño y orden de ejercicios, sino también los medios empleados para aplicar la resistencia. Entre estos medios podemos encontrar aquellos que la carga depende de la gravedad y que por tanto son de tipo isoinercial, como las máquinas guiadas o el peso libre (barras, mancuernas, poleas, etc.). Otros no dependen de la gravedad conocidos como no gravitacionales, entre los que destacan los elásticos, y otros, menos convencionales como pueden ser los dispositivos donde la resistencia la produce la acción de un motor eléctrico (por ejemplo, los dispositivos isocinéticos) o los dispositivos en los que la resistencia viene determinada por la energía cinética que tiene la masa movilizada, como en las máquinas flywheel.

Por último, otro componente importante de la carga de entrenamiento son los diferentes tipos de acciones musculares. Si bien es cierto que generalmente la prescripción de ejercicio de fuerza se hace empleando contracciones isotónicas, donde se trabaja el ciclo de estiramiento-acortamiento (CEA) y por tanto en las que se observa una fase concéntrica (por ejemplo empujando o levantando el peso) después de una fase excéntrica, con una breve fase isométrica en el cambio de contracción. Características distintas para cada una de ellas. Los programas de entrenamiento enfocado hacia el aumento de la fuerza y la masa muscular tradicionalmente se centraban de forma especial más la fase concéntrica (positiva), y desaprovechando la fase excéntrica (negativa) (por ejemplo frenando el peso). En los últimos años con el continuo reconocimiento de las ventajas, y posibilidades que

nos ofrece el ejercicio excéntrico, y el ejercicio excéntrico con sobrecarga en comparación con el ejercicio concéntrico, como alternativa del entrenamiento de fuerza dado su rol importante en potenciar adaptaciones saludables, actualmente está ampliamente empleado en rehabilitación, en el deporte de competición, con enfermedades crónicas, y hasta con ancianos frágiles.

Todo ello ha contribuido enormemente a que el ejercicio unilateral cobre especial relevancia en contextos de prescripción de ejercicio físico en poblaciones con limitaciones osteo-musculares. En el ámbito de las Ciencias del Deporte el término “entrenamiento unilateral” se refiere principalmente a ejercicios ejecutados únicamente con uno de los miembros. Sus efectos han sido ampliamente estudiados a lo largo de la literatura científica, dando lugar a la definición de un concepto: el efecto cruzado.

Tradicionalmente se ha empleado el término "educación cruzada" o “efecto cruzado” para describir el aumento de la capacidad neuromuscular (es decir, de la fuerza) en el miembro contralateral no entrenado como consecuencia del entrenamiento del otro de los dos miembros. Por ejemplo, nos referimos al efecto cruzado cuando hablamos del aumento de fuerza que experimentan los flexores del codo del brazo izquierdo tras un programa de entrenamiento de 12 semanas aplicado únicamente sobre los flexores del codo del brazo derecho. Cuando se habla del entrenamiento cruzado se refiere, por tanto, entre otros factores a los cambios en la actividad cortical del hemisferio contralateral. También se utilizan otros términos para referirse a este fenómeno de “efecto cruzado”: “transferencia cruzada”, “aprendizaje contralateral”, “entrenamiento contralateral” o “transferencia entre miembros”. Sin embargo, desde que fue acuñado por Walter W. Davis, (1899) (Behringer, et al., 2011)

El término más comúnmente utilizado es el de “educación cruzada” (EC; en Inglés “cross-education effect”). Numerosos estudios han demostrado que el entrenamiento de fuerza unilateral mejora no solo la fuerza muscular de la extremidad ipsilateral sino también la fuerza del músculo homólogo de la extremidad

contralateral no entrenada (Carrol et al., 2006). El trabajo de Edward Wheeler Scripture de 1894, ha sido decisivo en identificar la contribución del sistema nervioso a las mejoras bilaterales que se observan tras el entrenamiento unilateral de fuerza. De hecho, se ha demostrado que la magnitud media del efecto de educación cruzada sobre la fuerza muscular es del 21%, con un efecto mayor (27%) en los músculos de las extremidades inferiores en comparación con los músculos de las extremidades superiores (Hendy et al., 2017; Manca et al., 2018). En los últimos años, el EC ha sido propuesto como una estrategia terapéutica (Enoka, 1996; Duchateau, et al., 2016, Maroto-Izquierdo et al., 2017), en el ámbito de la rehabilitación, siendo empleado para mejorar la función del miembro contralateral afectado, aprovechando el aumento de fuerza en el miembro contralateral no entrenado inducido por el EC (Franchi et al., 2014; Maroto-Izquierdo et al., 2017) y una menor atrofia de los músculos inactivos en las áreas lesionadas del cuerpo (Duchateau et al., 2016).

A pesar de la importancia clínica de estos efectos, la mayoría de los estudios publicados en esta temática se realizaron con poco control sobre variables que podrían haber influido en el aumento de la fuerza. Se han propuesto diseños de investigación y metodologías que permiten controlar los principales factores que pueden influir en este (Friedmann et al., 2004; Gruber, et al., 2009; Friedmann et al., 2010) Entre ellos, destacan los efectos de aprendizaje de prueba, el control de la inactividad en el hemisferio no entrenado. (Friedmann et al., 2004). Sin embargo, a pesar de la abundancia de estudios previos, existe una gran variabilidad de los resultados. Este hecho dificulta su aplicabilidad y la magnitud del efecto cruzado parece estar relacionado con diferentes factores como lo muestra: a) los mayores efectos son observados cuando el lado dominante está entrenado (Green et al., 2018); b) el nivel de actividad física diaria de los participantes, con un efecto menor en las personas entrenadas; c) el nivel de conocimiento previo de la tarea de entrenamiento utilizada, con mayores efectos cuando se desconocen las tareas de (Zoeller et al., 2009), d) el tipo de contracción, se observa que el trabajo excéntrico (EXC), parece inducir un efecto mayor que el trabajo isométrico (ISO), y concéntrico (CON) (Farthing et al., 2003; Ruddy et al., 2013); y finalmente, e) las características del

protocolo de entrenamiento, con la existencia de una relación proporcional entre la carga aplicada y el aumento de la fuerza observado (Farthing et al., 2014; Hedges, 1981).

En cuanto al tipo de adaptación generada, la evidencia parece sugerir que las adaptaciones neuronales son mejores candidatos para la explicación de los resultados que las adaptaciones musculares (Lee, 2009; Green et al., 2018; Farthing et al., 2007) Esto se debe principalmente al hecho de que no se han encontrado adaptaciones vasculares significativas( Latella et al., 2012), ni hubo cambios histológicos en los niveles de hipertrofia, en la concentración enzimática, en la alteración de la composición de proteína contráctil, en el tipo de fibra o en el área de sección transversal (CSA). (Friedmann et al., 2004).

Al tratar de explicar estas adaptaciones, actualmente se postulan dos teorías que, aunque son compatibles entre sí, intentan explicar cómo se producen los mecanismos de adaptación neuronal (Farthing et al., 2007)

- (a) El modelo de "activación cruzada", que sugiere que las adaptaciones al ejercicio unilateral se extienden a la mitad opuesta del cuerpo, y
- (b) el modelo de "acceso bilateral", que mantiene que el esquema motor de una tarea unilateral es accesible tratando de reproducir la misma tarea en la mitad opuesta del cuerpo. Con respecto a los cambios observados en el sistema nervioso, estos pueden ocurrir a niveles periféricos, medulares, subcorticales y corticales (Gruber, 2009) A niveles periférico y medular, diversos estudios sugieren la existencia de alteraciones en la sincronización de unidades motoras y en la conductividad neural similares a las observadas en el lado entrenado (Friedmann et al., 2004). A niveles subcorticales y corticales, hay algunas evidencias que confirman la existencia de una interacción neuronal entre (Friedmann et al., 2004; Enoka, 1996), apoyando así el modelo de activación cruzada sugerido por Ruddy y Carson (Farthing et al., 2007).

Estudios recientes sobre el sistema de neuronas espejo (MNS), han demostrado que la simple visualización de un movimiento es suficiente para provocar adaptaciones (Moore et al., 2007; Behringer et al., 2011). Además de todo lo anterior, parece que el aprendizaje motor provoca reorganizaciones corticales (Friedmann et al., 2004) y que el entrenamiento unilateral produce plasticidad interhemisférica (Green et al., 2018) apoyando así el modelo de acceso bilateral.

Varios estudios han demostrado que el entrenamiento excéntrico acentúa el efecto de educación cruzada (Lepley et al., 2014). Hortobágyi (Hortobágyi et al., 1999), Coratella (Coratella et al., 2015) y Lepley y Palmieri-Smith (Lepley et al., 2014) informaron que el entrenamiento isocinético de extensión de rodilla excéntrico tuvo un efecto de educación cruzada sobre el torque excéntrico del 23, y 46%, respectivamente (Coratella et al., 2015), en la pierna no entrenada. También Weir, (Weir et al., 1995) mostraron que el entrenamiento de fuerza isotónico de carácter excéntrico condujo a ganancias significativas en la fuerza isométrica de la extremidad contralateral (observaron aumentos del 12%). En consecuencia, los protocolos de entrenamiento unilateral aislado excéntricamente han mostrado ganancias de fuerza entre el 47 y el 55 % (Lepley et al., 2014; Kidgell et al., 2015), en la extremidad no entrenada. Sin embargo, recientemente se ha demostrado que el entrenamiento acentuado excéntricamente (EOL), podría incluso inducir mayores efectos al proporcionar un estímulo óptimo tanto para las acciones concéntricas CON, como excéntricas EXC, especialmente cuando las contracciones excéntricas EXC, se dan a alta velocidad y a una mayor intensidad respecto a las contracciones concéntricas CON, (Maroto-Izquierdo et al., 2018). Por lo tanto, el uso de ejercicios isotónicos con sobrecarga excéntrica puede ser una alternativa para facilitar su aplicación y aumentar sus potenciales efectos neurofisiológicos

Según la literatura especializada, está ampliamente conocido que la educación cruzada es específica del grupo muscular homólogo y la magnitud de las ganancias contralaterales depende en gran medida de las obtenidas ipsilaterales (Manca et al., 2017; Manca et al., 2021).

Otro aspecto que parece es interesante de investigar, es el posible efecto que el entrenamiento de una extremidad ejerce no sobre la extremidad homóloga contralateral, sino sobre la otra extremidad del mismo lado (ipsilateral) del cuerpo a la extremidad entrenada. Sin embargo, hasta donde llega nuestro conocimiento, en la literatura científica no existe suficiente evidencia que analice en profundidad tal fenómeno. La escasa literatura existente arroja cierta evidencia sobre las posibles mejoras en los miembros superiores en fuerza máxima e hipertrofia después del entrenamiento de los miembros inferiores (Hansen et al., 2001; Madarame et al., 2008; Bartolomei et al., 2008). Situando los posibles mecanismos fisiológicos en adaptaciones (Gruber, 2009; Farthing et al., 2007; Aagard et al., 2000) y hormonales sistémicas (Hansen et al., 2001; Madarame et al., 2008) es decir, que no solo afectan a las articulaciones o extremidades entrenadas, sino a todo el cuerpo. De hecho, la evidencia actual indica que las intervenciones de entrenamiento de fuerza inducen cambios significativos en la neuroplasticidad (IntHout et al., 2016).

Publicaciones recientes han demostrado que el ejercicio de fuerza unilateral proporciona un enfoque único para provocar tal plasticidad. Con ello destaca la capacidad innata del sistema nervioso para adaptarse a dichas intervenciones unilaterales de ejercicio fuerza y de habilidades motoras específicas, independientemente de la edad o el sexo (Hopkins, 2021). Por ello, ha crecido el interés en torno al entrenamiento de fuerza en contextos clínicos en los que su implementación a los programas clásicos de rehabilitación, puede tener un papel determinante en la recuperación de lesiones o patologías neurológicas (por ejemplo, ictus o esclerosis múltiple) que afectan en diferente manera a la extremidad superior que a la inferior (Hopkins, 2021; IntHout et al., 2016).

A lo largo de la literatura, varios autores han informado una mejora en la fuerza de los flexores del codo de la extremidad ipsilateral cuando se agregó un entrenamiento coadyuvante de entrenamiento de fuerza de la parte inferior del cuerpo (Hansen et al., 2001; Bartolomei et al., 2018). Recientemente, Ben Othman y colaboradores. (Ben Othman et al., 2018), después de un programa de entrenamiento

de 8 semanas (24 sesiones) que incluía un ejercicio unilateral de prensa de piernas, observaron efectos similares sobre la fuerza tanto en los grupos musculares homólogos contralaterales no entrenados como en algunos grupos musculares de la extremidad ipsilateral (flexores del codo) en participantes jóvenes. Además, las mayores magnitudes de cambios en la pierna no entrenada contralateral y el brazo no entrenado se mostraron después del entrenamiento con intensidades más altas en comparación con intensidades más bajas (Ben Othman et al., 2018). Este fenómeno ipsilateral de los miembros inferiores hacia los miembros superiores podría significar que los cambios neuronales inducidos por el entrenamiento de fuerza no solo generan cambios en la fuerza de la musculatura implicada sino también en otras áreas del cuerpo no entrenadas.

Todo ello, hace pensar que la aplicación del ejercicio de fuerza con carga excéntrica acentuada unilateralmente (en Inglés, “accentuated eccentric loading”, AEL) podría ser una estrategia eficaz para lograr la optimización de la musculatura del miembro superior, tanto para fines deportivos como de rehabilitación, sin necesidad de su entrenamiento específico. Sin embargo, dada la necesidad de mayor evidencia sobre la posible extensión de los efectos de transferencia del efecto cruzado de extremidades inferiores a superiores (es decir, músculos heterólogos ipsilaterales) y la superioridad observada del entrenamiento acentuado excéntricamente para promover cambios neurales que conducen a un mayor efecto de educación cruzada sobre la fuerza. Con la hipótesis de que el entrenamiento con sobrecarga excéntrica realizado por el miembro inferior de la extremidad dominante puede conducir a ganancias significativas en variables neuromusculares, lo que tendría un impacto importante en entornos clínicos y de rehabilitación, específicamente con pacientes que tienen un miembro inmovilizado o trastornos neurológicos.

En este estudio nos planteamos analizar los efectos de un programa AEL unilateral aplicado en la extremidad inferior dominante de 10 semanas de duración,

sobre las variables relacionadas con la fuerza de las extremidades superiores ipsilaterales y la masa muscular en hombres y mujeres físicamente activos.

## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1 EL SISTEMA NEURO MUSCULAR

Nuestras acciones, desde las más simples hasta las más exigentes, dependen de la capacidad del sistema neuromuscular de producir fuerza. Esta capacidad nos permite realizar tareas motrices con diferentes niveles de complejidad, sin pensar en el movimiento articular o la contracción muscular necesaria, así como los detalles propios del movimiento (Pocock y Richards, 2005). Esta capacidad de producir fuerza depende a su vez de dos grandes elementos: el sistema nervioso, que recibe información, la procesa y emite órdenes que viajan a lo largo de nuestro cuerpo por medio del tejido nervioso periférico en forma de señal eléctrica, hasta llegar a la unión neuromuscular, donde una reacción electroquímica hará pasar a la acción al segundo gran componente, el tejido muscular. Este será el encargado de llevar ese impulso eléctrico hasta las unidades contráctiles más pequeñas, que responderán químicamente acortándose, y por tanto, produciendo tensión. El sistema muscular constituye el 40% de peso corporal total, estando constituido por más de 600 músculos que varían en tamaño, forma y utilidad. La mayor parte de ellos son proyectados a producir tensión para generar movimiento articular en distintas direcciones o estabilizarla, pero también tienen una función determinante en la movilización de fluidos corporales y en la protección de órganos, además de dar forma al cuerpo. En base al modelo de Hill (1950), el complejo mio-tendinoso consiste en una unidad única constituida por componentes contráctiles y elásticos que actúan sobre los componentes pasivos del movimiento (huesos y articulaciones) mediante los momentos de fuerza (tensión producida) que desarrollan los componentes

contráctiles y elásticos sobre estos a través del tendón. Sin embargo, desde el punto de vista fisiológico, la producción de tensión es un proceso mucho más complejo.

Las propiedades contráctiles básicas de un músculo, vienen determinadas por su estructura, es decir, por la forma en que sus fibras están organizadas. De este modo, si tuviéramos un músculo con tres fibras, éstas podrían disponerse en serie (una a continuación de otra) o en paralelo (una al lado de otra), o también en un ángulo determinado en relación con la línea de tensión lineal del músculo. Cuando las fibras están ubicadas en serie, favorecen mayores rangos de movimiento y una mayor velocidad de acortamiento ((Enoka, 2002; Billeter, 1992; pocock y Richards, 2005; Douglas et al., 2017).

Sin embargo, cuando se encuentran ubicadas en paralelo, favorecen una mayor producción de fuerza con una menor velocidad de (Enoka, 2002; Billeter, 1992; pocock y Richards, 2005; Douglas et al., 2017). Por último, cuando están organizadas formando un ángulo con la línea de tensión, la tensión neta que puede generar la fibra es (Enoka, 2002; Billeter, 1992; pocock y Richards, 2005; Douglas et al., 2017).

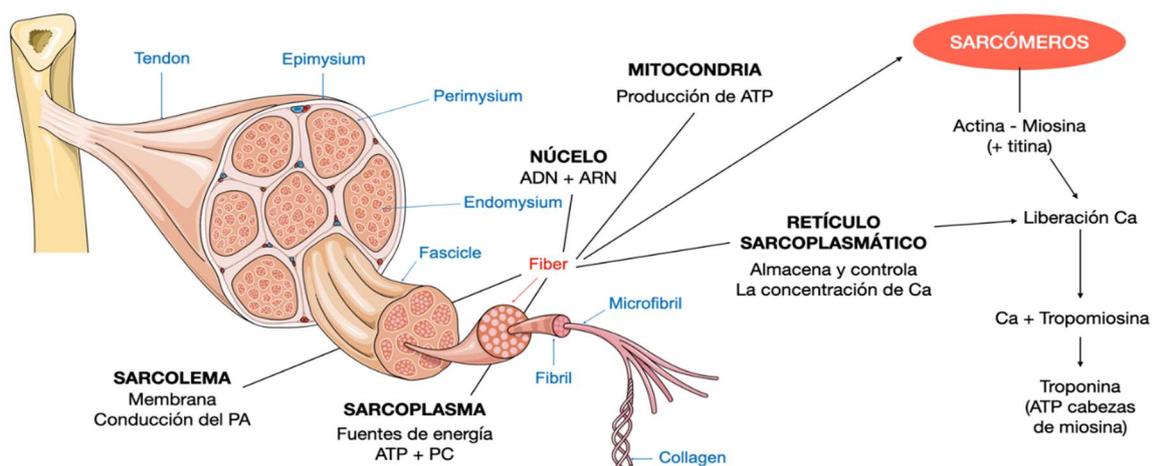


Figura 1. Esquema de la organización interna del sistema miotendinoso y del contenido de la fibra muscular. (Douglas et al., 2017).

## 2.2. ¿CONTRACCIONES O ACCIONES MUSCULARES?

En los seres humanos, como en los animales, el músculo esquelético produce una mayor o menor tensión en relación a la resistencia a vencer, pudiendo resultar en tres tipos de contracción posibles: aquellas en las que la contracción se da en ausencia de cambio en la longitud de la fibra; aquellas en las que se produce un acortamiento en la longitud de la fibra muscular, y por último, aquellas en las que se da un alargamiento o elongación de las mismas (Knuttgen y Komi, 2003; Ratamess, 2012). En el primer caso, se producen altos niveles de tensión pero no se genera movimiento, mientras que en las otras dos posibilidades si se dan cambios en la longitud de los músculos y en el ángulo articular, siendo ésta una de las funciones más importantes del músculo. A pesar de estar clara diferenciación en la biomecánica muscular, a lo largo de la literatura científica se ha observado una cierta controversia terminológica respecto a la nomenclatura establecida para referirse al estado de actividad del músculo. A nivel científico, se ha optado por el uso del término “acción muscular” para indicar el sentido de la fuerza desarrollada por el músculo (Knuttgen y Kraemer, 1987; Faulkner, 2003). Por tanto, desde ahora en adelante, el término “acción muscular” será utilizado en la presente tesis doctoral, de acuerdo con la terminología usada en los textos académicos de asociaciones como el “American College of Sports Medicine” - ACSM (Ratamess, 2012), o la “National Strength and Conditioning Association” - NSCA (Kraemer y Vingren, 2007). Mientras que el concepto de “contracción muscular” lo utilizaremos para referirnos al fenómeno que, como resultado de una reacción electroquímica, provoca un mayor o menor acortamiento o elongación de los puentes de actina y miosina, dando como resultado la producción de fuerza en una determinada dirección. Actualmente, se reconocen tres tipos de acciones musculares implicadas en la producción de fuerza: las acciones isométricas, las acciones concéntricas y las acciones excéntricas (Knuttgen y Komi, 2003). También se sabe que en las acciones excéntricas es donde mayor fuerza se

puede llegar a producir, seguidas por las acciones isométricas y, por último, por las acciones concéntricas, dando lugar al perfil fuerza-velocidad aunque la manifestación de esta cualidad está condicionada por aspectos como la arquitectura muscular, la longitud de las palancas empleadas, la velocidad del movimiento, la ejecución técnica o el tipo de resistencia a vencer, entre otros (Kraemer y Vingren, 2007). Además, la interacción de estos factores entre si y las acciones musculares ha dado lugar a la aparición de otros conceptos biomecánicos relacionados como: isotónico, Isocinético, auxotónico, isoinercial, entre otros, que se abordarán a lo largo de los antecedentes de la presente tesis doctoral (Knuttgen y Komi, 2003; Ratamess, 2012). En este apartado se propone una breve explicación de las diferencias entre los tipos de acciones musculares.

### **2.3 TIPOS DE ACCIONES MUSCULARES.**

Existen dos tipos de acciones musculares: Estáticas (o isométricas), y dinámicas. Las dinámicas a su vez se clasifican en concéntrica y excéntrica.

- Las acciones musculares isométricas o estáticas: Su etiología terminológica proviene del griego: “iso” (igual) y “métrico” (medida). Es una acción en la que se produce una tensión elevada en el músculo, sin alterar su longitud, ni modificar el ángulo articular (Ratamess, 2012), es decir, la resistencia es igual a la fuerza producida, o la resistencia es inamovible, y por tanto las fibras permanecerán fijas con la misma longitud (Faulkner et al., 2007). Desde el punto de vista de la física, no se ejecuta trabajo (Knuttgen y Komi, 2003) y esto generalmente ocurre porque la resistencia externa a la que se opone el músculo no es vencida por la fuerza que se aplica sobre ella (Kraemer y Vingren, 2007). Cabe destacar el papel fundamental de las acciones isométricas en la estabilización y mantenimiento de las posiciones corporales.

- Las acciones musculares concéntricas: Tienen su etiología terminológica en el latín, “con” (centrum) con un mismo centro, es una acción donde la tensión acerca los extremos del músculo hacia el centro, ocasionando el acortamiento de la estructura fibrilar muscular, provocando el acercamiento de las palancas y la reducción de los ángulos articulares (Knuttgen y Komi, 2003; Ratamess, 2012). Son acciones también llamadas miométricas o de trabajo positivo (Faulkner, 2003). Las acciones concéntricas son posibles cuando la resistencia a vencer (la carga) es menor que el potencial máximo del sujeto (su capacidad de producir fuerza). Es decir, cuando la fuerza desarrollada por las fibras musculares es mayor que la resistencia ofrecida por la carga externa. Desde mediados del siglo XX, fue la base de la teoría de filamento deslizante de Huxley (Kraemer y Vingren, 2007), confirmada en varios estudios posteriores (Huxley, 2004), y constituye la clásica explicación de los mecanismos moleculares de la contracción muscular.

- Las acciones musculares excéntricas: Este tipo de acción muscular se conoce también como trabajo negativo (Faulkner, 2003; Ratamess, 2012), ya que se trata de una acción muscular donde la tensión separa los extremos del músculo, o las bandas Z del sarcómero desde un punto de vista microscópico. Generalmente, estas acciones ocurren cuando la fuerza producida por el músculo es inferior a la carga externa aplicada, creando un cambio en la longitud del músculo que es opuesto al del vector de fuerza producida por la resistencia a vencer (Gerber et al., 2006). Por tanto, este tipo de acción muscular hace que la unidad músculo-tendón se alargue, absorbiendo así energía mecánica (elástica) que sirve para detener movimientos y para promover contracciones concéntricas subsecuentes de mayor dimensión, al hacer uso del ciclo de estiramiento-acortamiento miotendinoso. Este tipo de acción supondrá una amplia área de estudio, dentro del cual se ubica esta tesis, y por tanto, la fisiología

muscular que subyace tras este tipo de contracción se abordará en detalle a lo largo de este documento.

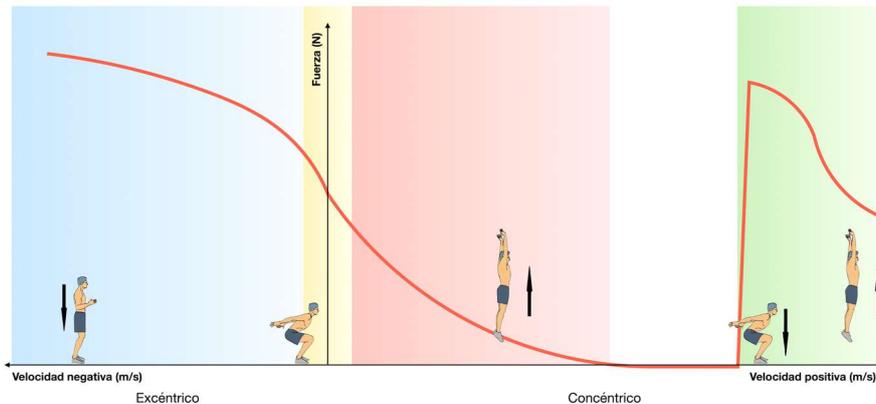


Figura 2– Tipos de acción muscular ejemplificados en un salto vertical, en el que acontece una acción excéntrica de tipo decelerativo para impulsarnos; una acción isométrica al final de la acción excéntrica para cambiar la dirección de la fuerza en la que no se produce un cambio en la longitud de la fibra muscular, y por último se inicia la fase propulsiva, determinada por la acción concéntrica subsecuente (Adaptado de Maroto-Izquierdo, 2019).

#### 2.4. EL CONCEPTO DE LA FUERZA

Numerosos autores han tratado de definir el concepto de fuerza a lo largo de la literatura científica. La fuerza es una magnitud física y desde el punto de la función muscular a lo largo de la bibliográfica especializada, particularmente en Inglés, frecuentemente aparecen tres términos que no deben ser utilizados como sinónimos: “Force”, “Strength” y “Resistance”. El primero hace referencia a la “Tensión” como función primaria de los músculos, es decir, la forma en que el sistema neuromuscular produce fuerza como capacidad condicional humana. Y da lugar a la fuerza muscular como capacidad del sistema neuromuscular para producir deformaciones en un cuerpo, modificar la aceleración del mismo, iniciar o detener su movimiento, alterar su velocidad o cambiar su dirección, siendo el resultado de la suma de las tensiones producidas en las unidades motoras activadas durante transcurso de cada acción. En

segundo lugar el término "Strength", hace alusión a la fuerza propiamente dicha que una persona es capaz de desarrollar ante una determinada situación. La fuerza depende del grado de tensión producido por  $\text{cm}^2$  de superficie muscular, a su vez está determinado por la cantidad de puentes cruzados de actina y miosina. Es decir que cuanto mayor sea el número de estos puentes cruzados por superficie de fibra muscular, mayor será la tensión y por ende la fuerza producida (Martin y Carl, 2001; Naclerio, 2005; Watkins, 1999). Y, por último, la expresión "Resistance" hace referencia a la resistencia que una determinada fuerza es capaz de vencer, y que se relaciona con los medios utilizados para producirla y estimularla, es decir, los propios ejercicios y los medios materiales que se usan para dicho fin.

En el ámbito de la fisiología muscular y las Ciencias del Deporte, el concepto de fuerza ha ido evolucionando con el paso de los años. Grosser y Müller (1992) definen la fuerza, como la capacidad del sistema neuromuscular de superar resistencias a través de la actividad muscular (trabajo concéntrico), de actuar en contra de las mismas (trabajo excéntrico) o bien de mantenerlas estables (trabajo isométrico). A nivel estructural, la fuerza está en relación con el número de cabezas de miosina que pueden interactuar con los filamentos de actina (Goldspink, 1992). Por ello la fuerza se define como la "capacidad de un músculo o grupo muscular para vencer o soportar una resistencia bajo unas condiciones específicas" (García-Manso, 1996). Kraemer (1999) define la fuerza muscular como la capacidad de un músculo de generar y transmitir tensión en la dirección de sus fibras. Posteriormente, González-Badillo y Gorostiaga (2002) la definen como la capacidad de producir tensión que tiene el músculo al activarse, o como se entiende habitualmente, al contraerse. Desde el punto de vista de la física, la fuerza muscular sería la "capacidad de la musculatura para producir la aceleración o deformación de un cuerpo, mantenerlo inmóvil o frenar su desplazamiento, en ocasiones, la resistencia a la que se opone la musculatura es el propio cuerpo, y en otras ocasiones se actúa sobre resistencias externas" (Siff y Verkoshansky, 2000). Harman (1993) en su definición abarca todos estos puntos, definiendo la fuerza como "la habilidad de generar tensión bajo determinadas condiciones definidas por la oposición del cuerpo, el movimiento en el que se aplica,

el tipo de activación (concéntrica, excéntrica, isométrica y polimétrica) y la velocidad de movimiento”. En el deporte, no sólo interesa la fuerza aplicada en relación con la velocidad del movimiento, sino también es importante considerar la fuerza que se puede manifestar en un tiempo dado, sobre todo en periodos de tiempo muy reducidos (100-200 ms). Ante esta realidad, la fuerza en un deportista también se podría definir como “la máxima tensión manifestada por el músculo en un tiempo determinado” (Knuttgen y Kraemer, 1987). En definitiva, todas las manifestaciones de la fuerza reflejan en cierta medida la tensión producida por el músculo. Por tanto, en el campo deportivo, la tensión viene transformada en fuerza, y hablaremos de ella en newton, N (Bosco, 1988). Por lo tanto, es necesario tener en cuenta los factores que intervienen en el proceso de la producción de la tensión muscular y que de una manera u otra influirán en el grado de fuerza producida en la tarea motriz. Esos factores son los siguientes:

- Tipos básicos de activación o acción muscular.
- La velocidad y aceleración de la acción.
- Magnitud de la tensión.
- Fases en las que se acentúa la manifestación máxima de la fuerza dentro del desarrollo del movimiento.
- Condiciones iniciales de la ejecución: sin estiramiento previo (Isométrica) o con estiramiento y con este último tenemos que considerar la longitud y velocidad del estiramiento y el tiempo transcurrido entre las fases de estiramiento y acortamiento (ciclo de estiramiento-acortamiento CEA y procesos reflejos involucrados).

De este modo, varios autores han asociado el concepto de la fuerza con la tensión máxima que un músculo o grupo muscular puede desarrollar (Corbin et al., 2008; Dwyer y Davis, 2008). Y, dado que esta cualidad resulta específica para cada tipo de contracción (estática o dinámica), acción muscular (concéntrica o excéntrica), velocidad de movimiento y ángulo articular (Knuttgen y Komi, 2003; Dwyer y Davis,

2008), aparecerán diferentes parámetros cinéticos y cinemáticos que definirán las características del movimiento. Por ello, la fuerza se puede definir como “la máxima tensión generada por un músculo o grupo muscular en un determinado patrón de movimiento, según la velocidad establecida y las acciones musculares involucradas” (Knuttgen y Komi, 2003; Ratamess; 2012). A modo sintético, se proponen las siguientes definiciones para el concepto de fuerza, tanto desde el punto de vista mecánico, como desde el punto de vista fisiológico:

- **Mecánica:** La fuerza se manifiesta como una acción capaz de inducir cambios en el comportamiento de un cuerpo modificando el estado del mismo (González-Badillo y Ribas, 2002; Naclerio, 2010).
- **Fisiológica:** La fuerza es la capacidad funcional para generar movimiento, que se expresa por la acción conjunta del sistema nervioso y muscular para generar tensión (Bosco, 2000; Siff y Verkhoshansky, 2000).

## 2.5. TIPOS DE TENSIÓN MUSCULAR

El análisis conceptual de la fuerza muscular resalta la importancia de la tensión muscular producida a nivel sarcomérico, y como la magnitud y la forma de producción de esa tensión mecánica da como resultado la fuerza neta producida por un músculo. Por ello, resulta determinante conocer los tipos de tensión muscular que el ser humano es capaz de manifestar:

- **Tónica:** se produce cuando se trata de vencer una gran resistencia, tanto a través de una contracción isométrica (fuerza estática) como anisométrica (fuerza dinámica). La duración de la tensión es relativamente larga, la velocidad de la ejecución es lenta o nula y la fuerza manifestada, está próxima al límite máximo que el sujeto puede desarrollar. El pico máximo de fuerza ( $F_{Max}$ ) se alcanza durante esta contracción (González-Badillo y Gorostiaga, 2002).

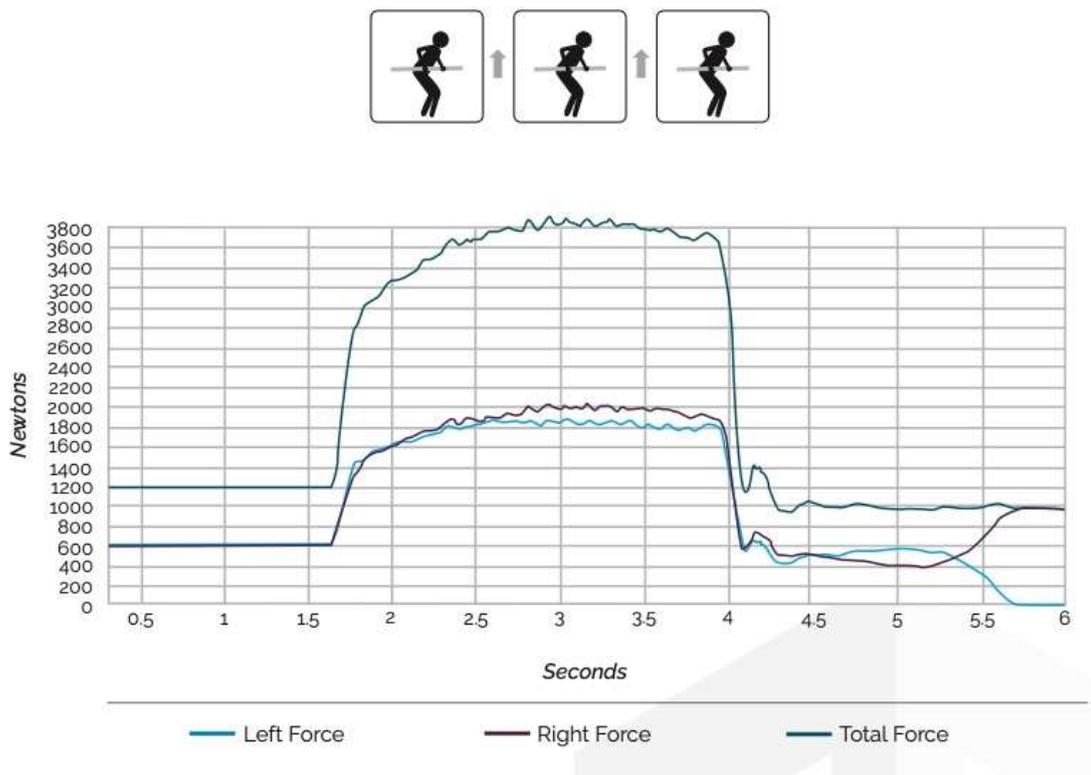


Figura 3. Ejemplo de una acción isométrica máxima (mid-thigh pull test) en la que se produce tensión tónica. (Tomado del software HAWKIN DYNAMICS)

- Tónico-explosivo o isométrico-explosivo: Es la que se manifiesta cuando se pretende vencer una resistencia significativa, pero inferior a la fuerza máxima absoluta que el sujeto es capaz de desarrollar. La contracción es concéntrica, aunque con un componente isométrico de cierta importancia. Se alcanza rápidamente una elevada manifestación de fuerza y velocidad y se consigue un elevada FMax hacia el final del movimiento. Aunque en algunos casos, se pierde el contacto con el objeto o resistencia, o se genera un impulso en el implemento o resistencia, y por tanto, la fuerza aplicada disminuye. Se produce cuando levantamos pesos o lanzamos objetos muy pesados. Un salto sin contra movimiento, sin estiramiento previo, es un ejemplo válido de este tipo de tensión para las cargas más ligeras (González-Badillo y Gorostiaga, 2002).

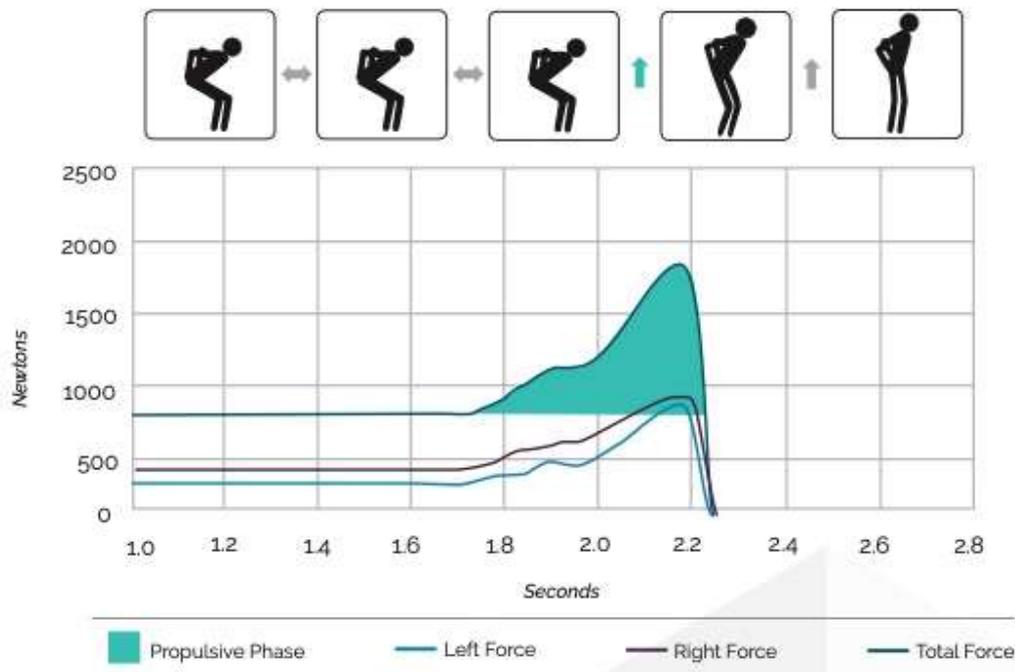


Figura 4. Ejemplo de una acción dinámica concéntrica explosiva (squat jump test) en la que se produce tensión tónico-explosiva. (Tomado del software HAWKIN DYNAMICS)

- Elástico-explosivo: Es aquella tensión que tiene lugar cuando tratamos de vencer una resistencia relativamente pequeña. La fuerza se manifiesta desde el principio o en el medio del desarrollo de la tensión, con una FMax alta que inmediatamente después comienza a disminuir. En este caso, a partir de un determinado punto del rango de movimiento la aplicación de fuerza comienza a ser menor, hasta aparecer. Esto es debido a la creación de un impulso consecuencia de la alta aceleración a la que se somete a la resistencia y a que se llegue a perder el contacto con el punto de aplicación de fuerza. Un ejemplo, cuando golpeamos un balón en un saque de tenis o en un salto normal partiendo desde posición de bipedestación y haciendo uso del ciclo de estiramiento acortamiento (González-Badillo y Gorostiaga, 2002).

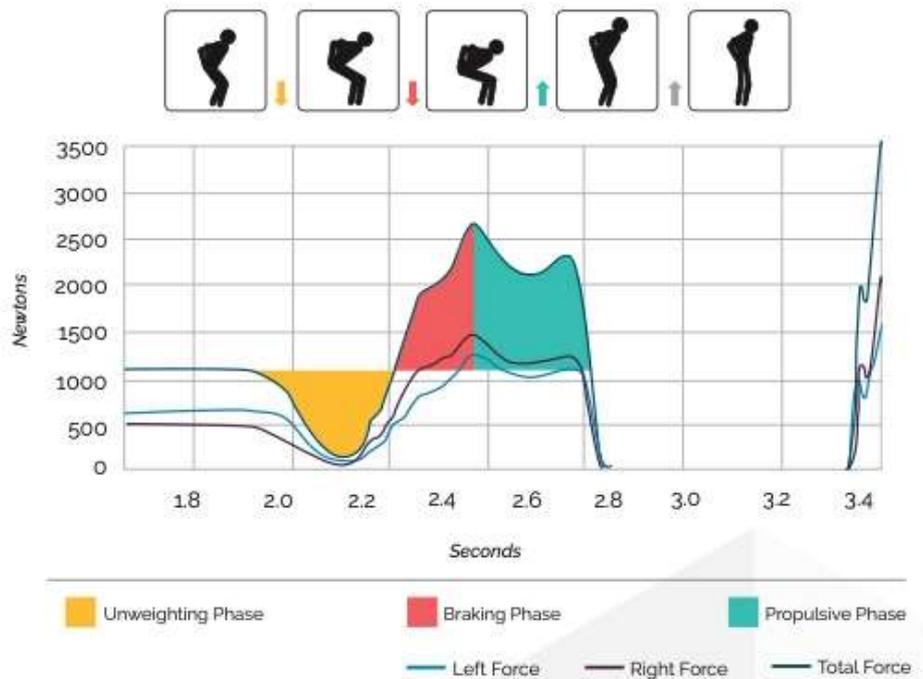


Figura 5. Ejemplo de una acción dinámico-concéntrica (salto con contra movimiento o countermovement jump test) en la que se produce tensión elástico-explosiva. (Tomado del software HAWKIN DYNAMICS)

- Elástico-explosivo-reactiva (refleja): tiene las mismas características del anterior, pero con la particularidad de que la fase de estiramiento es muy breve, intensa, y más rápida que en una acción únicamente elástico-explosiva. Además, la reacción excéntrico concéntrico se da en un menor tiempo y generalmente la acción excéntrica se encuentra acentuada (por ejemplo, cayendo de una altura), potenciando el uso del ciclo de estiramiento-acortamiento al acumular mayor energía elástica en los componentes elásticos y hacer uso de su rigidez en la acción concéntrica inmediatamente subsecuente. También la FMax se manifiesta antes, pero dura menos tiempo. Los gestos son similares a los anteriores, pero la inclusión en uno o en otro grupo, depende de las características del ciclo de estiramiento- acortamiento CEA. Un ejemplo de este tipo, es el salto desde diferentes alturas, con una rápida reacción para elevarse lo máximo

posible y en el menor tiempo de contacto con el suelo posible después de la caída.

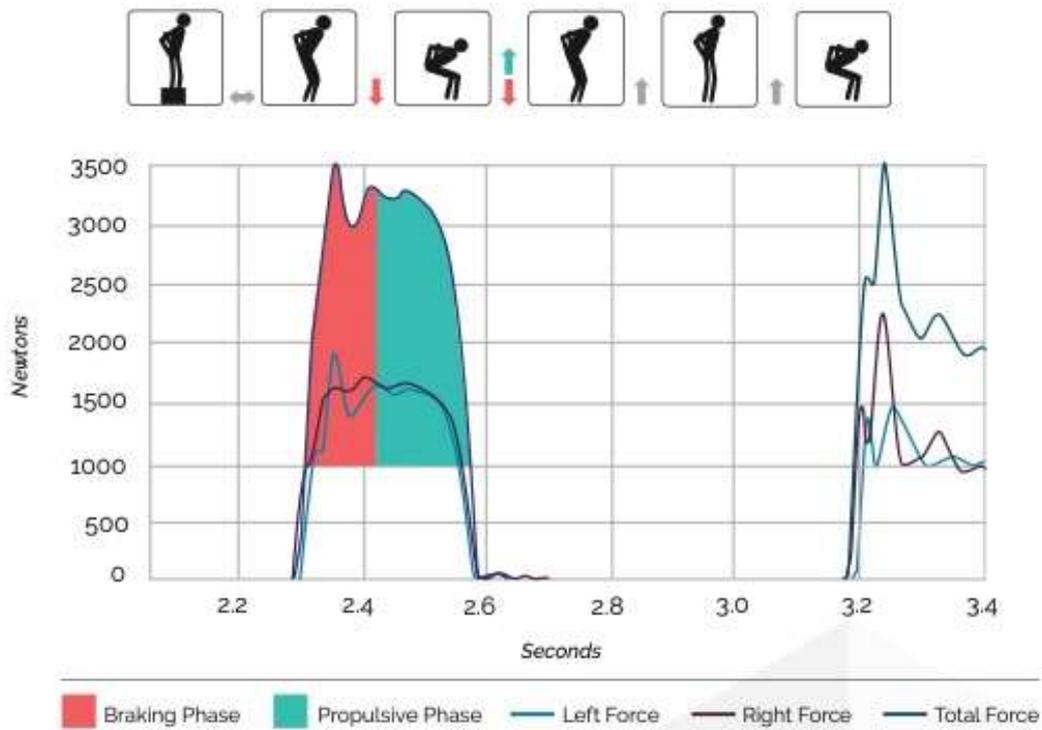


Figura 6. Ejemplo de una acción dinámica concéntrica de carácter reactivo-explosivo máxima (Drop jump) en la que se produce tensión Elástico-explosivo-reactiva. (Tomado del software HAWKIN DYNAMICS)

## 2.6. LA FUERZA Y SUS MANIFESTACIONES.

La fuerza muscular se considera como la habilidad que tienen los músculos para acelerar, deformar, mantener un cuerpo inmóvil o decelerar una masa (Blazevich, 2017). Esta aplicación de fuerza puede ser la ejercida para vencer la resistencia que la gravedad ofrece sobre nuestro cuerpo cuando hacemos (Por ej. Un salto vertical, o la aplicada sobre una barra cuando la levantamos, mantenemos o frenamos en el ejercicio de sentadilla). Por tanto, la producción y aplicación de la fuerza de la musculatura esquelética está condicionada por su capacidad de contracción. Esta contracción muscular puede darse en varias direcciones y siempre a una determinada

velocidad (velocidad angular positiva, nula o negativa), dando así lugar a las contracciones, isométricas (fuerza muscular igual a la fuerza ejercida por la resistencia, con ausencia de cambios en la longitud muscular), las contracciones concéntricas (aceleración, por acortamiento muscular) y excéntricas (deceleración, por elongación muscular), que aisladas o en combinación determinarán las manifestaciones de la fuerza. Éstas manifestaciones pueden ser máximas, submáximas o/y relativas (Cuando la fuerza máxima se expresa con relación al peso corporal y la masa magra, para las comparaciones entre individuos o géneros, (Ratamess, 2012)). Desde la perspectiva del entrenamiento, distinguiremos 3 grandes manifestaciones de la fuerza que aparecen en diferentes situaciones y con distintas finalidades (González-Rave et al., 2014).

### 2.6.1. Manifestación isométrica.

Basada en el uso de contracciones isométricas, máximas o no. Puede ser:

- 1). Fuerza máxima isométrica: entendida como la capacidad para producir la máxima tensión posible sin generar movimiento contra una resistencia fija e insuperable (Weineck, 2005); su magnitud es algo inferior a la fuerza máxima excéntrica y ligeramente superior a la concéntrica (+5 a +10%). Cada valor de la fuerza isométrica debe venir acompañado de su correspondiente información sobre el ángulo y/o posición en la que se ha conseguido (González-Badillo y Gorostiaga, 2002), Por ejemplo, un test en el que valoremos la máxima acción isométrica voluntaria, como el mid-thigh pull test.
- 2). Fuerza resistencia: definida como la capacidad de mantener una contracción por el mayor tiempo posible (Dwyer y Davis, 2008), vinculado a un rendimiento específico ante un esfuerzo submaximal que resiste a la fatiga (Ratamess, 2012; Corbin et al., 2008), de modo que los niveles de tensión no se reduzcan significativamente como para perjudicar el

rendimiento. Por otro lado González-Badillo y Gorostiaga, no consideran la fuerza-resistencia como una manifestación de fuerza, puesto que se trata de la capacidad de mantener la manifestación de una o varias expresiones de la fuerza durante más o menos tiempo. También es un objeto de entrenamiento, que va a permitir que cualquier manifestación de fuerza, se realice al mejor nivel durante un tiempo determinado (González-Badillo y Gorostiaga, 2002). Por ejemplo, una plancha lateral manteniendo la cadera superior en abducción.

### 2.6.2 Manifestación dinámica

Aquella basada en el uso de al menos una contracción dinámica (concéntrica, excéntrica o ambas):

1). Fuerza inicial.: Capacidad de generar la mayor fuerza posible al inicio de una acción muscular, en muy poco tiempo y antes de observarse movimiento externo. Algunos autores se refieren a ella como la fuerza desarrollada en los primeros 30-50 milisegundos (González-Badillo y Gorostiaga, 2002).

2). Fuerza máxima concéntrica: Definida como la tensión producida ante una resistencia superable en una única repetición. (Weineck, 2005), Por ejemplo, una valoración de una repetición máxima 1-RM, (ej. El ejercicio de press banca), que es comúnmente utilizado no solo como un índice de los niveles de fuerza, sino como un punto de referencia para planificar los entrenamientos (Naclerio, 2005). Su magnitud estará limitada por el punto o fase del recorrido articular donde se produce la mayor desventaja mecánica del movimiento, respecto a los momentos de fuerza aplicados por la resistencias externas, su magnitud es entre un 50% a 60% y un 5% a 10% inferior a la fuerza máxima excéntrica y estática. (Weineck, 2005).

3). Fuerza máxima excéntrica: Se relaciona a la mayor capacidad de regular o tolerar una resistencia externa, que por su magnitud, determina un alargamiento de la masa muscular (Siff y Verkhoshansky, 2000); es decir que la acción muscular se desplaza antes de una resistencia en el sentido opuesto al deseado por el sujeto para detener el movimiento. Por ejemplo, la aplicada en el ejercicio Nordic curl.

4). Fuerza explosiva (o impulso): Se refiere a la fuerza producida desarrollando altos valores de tensión muscular en el menor tiempo posible (Verkhoshansky, 2002) Nos referimos a ella como RFD. Por ejemplo, una sentadilla con salto partiendo de la posición de flexión de rodillas.

### 2.6.3. Manifestación reactiva

Aquella basada en el uso del ciclo de estiramiento-acortamiento (acción concéntrica máxima subsecuente a una acción excéntrica). Dentro de la manifestación reactiva encontramos dos tipos:

1). Fuerza elástico-explosiva (CEA lento). Es la fuerza producida por la acción neuromuscular concéntrica en sinergia con los componentes elásticos previamente elongados durante la acción excéntrica. La importancia de la capacidad contráctil y de los mecanismos nerviosos de reclutamiento y sincronización es menor, en comparación con la fuerza explosiva, puesto que un porcentaje del resultado se debe a la elasticidad. Por ejemplo, un salto con contra-movimiento (González-Badillo y Gorostiaga, 2002).

2). Fuerza reactivo-elástico-explosiva (CEA rápido). Igual que la anterior, pero añadimos la facilitación neural promovida por el reflejo miotático al realizar una acción concéntrica con una amplitud limitada y una velocidad de ejecución muy elevada precedida de una acción excéntrica potenciada,

con el cual favorece el reclutamiento de una mayor cantidad de unidades motoras, para desarrollar una gran tensión en un corto periodo de tiempo. Por ejemplo, un drop jump. Grosser (1992) afirma que este tipo de fuerza sólo se manifiesta de forma completa si el CEA se sitúa por debajo de 200 ms.

## **2.7. RELACIÓN ENTRE LA CAPACIDAD DE APLICAR FUERZA Y EL TEJIDO MUSCULAR Y DIFERENCIAS ENTRE SEXOS**

En general, la masa muscular del tren superior, presenta las mayores diferencias en fuerza entre ambos sexos, ello puede ser relacionado con un menor porcentaje de masa muscular en las mujeres M, (Miller et al., 1993). La musculatura en ambos sexos, tiene las mismas características fisiológicas y responde al entrenamiento de la misma forma. La producción de fuerza del músculo, está directamente relacionada con el área de sección transversal CSA, (Miller et al., 1993). Esto parece ser cierto en todas las velocidades del movimiento. En general, ambos sexos disponen del mismo porcentaje de fibras musculares tipo I y tipo II, aunque está bien demostrado, que la media del músculo vasto lateral de los H tiene un mayor porcentaje (62% vs 50%) de fibras del tipo II que de las M. Estas además, tienen fibras musculares más pequeñas que los hombres H entrenados y no entrenados, y las áreas de sección transversal entre entrenados y no entrenados tienen el mismo porcentaje (66%, 71%) (Staron et al., 2000). Otro aspecto mencionado por algunos autores (Lui et al., 2010); Wust, (2008), es que H, generalmente, son más fuertes que M y tienen grandes fibras musculares CSA, especialmente por el tipo II y que al contrario las M generalmente tienen una alta proporción oxidativa del tipo I y más densidad capilar en el músculo, y son más resistentes a la fatiga muscular. También los mismos autores concluyen que la fatiga relativa al género se puede explicar con la motivación, el tamaño de músculo, la capacidad oxidativa o la oclusión del flujo de sangre además puede ser relacionada con las diferencias de la composición de la fibra muscular. La

investigación de (Hicks et al., 2001), afirma al contrario de lo que habíamos mencionado antes, los H tienen una resistencia a la fatiga mucho mayor que las M, posibles factores de esa diferencia entre sexos, pueden estar relacionados con la masa muscular y los sustratos metabólicos utilizados, la morfología de músculo, y la activación neuromuscular, sin influencia del sexo en la pérdida de fuerza, y la recuperación después un daño muscular o después un trabajo excéntrico. Lui et al., (2010), comentan que otra diferencia entre sexos en la respuesta muscular y las adaptaciones a los estímulos fisiológicos, como el entrenamiento y el desentrenamiento, es que los hombres expresan generalmente mayor respuesta hipertrófica después de un entrenamiento de fuerza, sea en jóvenes o en mayores, aunque son los primeros que manifiestan los efectos del desentrenamiento. También afirman que otra importante diferencia entre la musculatura de H y M puede ser la cantidad de grasa en el músculo, pues las M tienen una mayor cantidad de grasa entre los fascículos comparadas con los H. Aunque este factor no afecta al entrenabilidad del tejido muscular (Miller et al., 1993). Otro factor que puede afectar, es la concentración de testosterona en el sangre, que resulta 10 veces mayor en H que en M (Fleck y Kraemer, 1997), y esto puede influir significativamente en la diferencia de la hipertrofia entre sujetos de ambos sexos (Bosco, 2000). Otras hormonas, como el cortisol y la hormona del crecimiento, podrían tener un efecto positivo en el aumento de la masa muscular. Además unas bajas concentraciones de una hormona no significan necesariamente que esta no tenga un papel activo en una función corporal o de un proceso de crecimiento (Fleck y Kraemer, 1997).

De manera global, la media de la fuerza máxima en la M es el 63,5% del total del H: a su vez la fuerza isométrica en el miembro superior corresponde al 55,8% de la de estos y en el miembro inferior supone en 71,9%. Laubach, 1976, citado por (Jiménez, 2003). Esta gran diferencia entre sexos, es el resultado de distintas posibilidades de movimiento en las articulaciones del miembro superior e inferior, y de diferencias también en la distribución de la masa muscular en diferentes partes del cuerpo (Jiménez, 2003). Estas diferencias en varios estudios, están causadas en parte por los distintos tipos de tests utilizados para la fuerza máxima. La fuerza extensora de la

rodilla de la M es el 50% de la del H en un test máximo en máquina. Pero cuando valoramos su momento de fuerza máximo en la misma acción medida en un ergómetro isocinético a 90°/s, este valor alcanza el 78% del obtenido por el H (Fleck y Kraemer, 1997). Los datos isométricos, indican que la fuerza absoluta (sin considerar el peso corporal) del miembro inferior de la M, está en general próxima a la del H, cosa que no ocurre con el tren superior, y la fuerza mayor de los H y la diferencia entre los sexos, se puede atribuir de manera primaria en el tren superior a las grandes fibras (Miller et al., 1993), de hecho, las M tenían baja distribución de su tejido magro en el tren superior, y estas diferencias sexuales se mantienen incluso con deportistas de alto nivel, cuando son comparados con los H de la misma categoría.

Por otra parte, el tamaño corporal puede explicar parcialmente la diferencia de fuerza muscular existentes entre géneros. En un trabajo de Wilmore (1974) citado por Jiménez (2003), se manifestó que la fuerza máxima de 1-RM en press de banca de la M, correspondía con el 37% de la del H, y si este valor era relacionado con el peso corporal o al peso de la masa magra, la M alcanzaba el 46% y 55% para miembro superior e inferior respectivamente. De igual forma, la fuerza máxima isométrica del miembro inferior en la M, representa el 73% de la del H; pero si es expresada en relación con la masa magra, la M puede ser fuerte más que el H (Fleck y Kraemer, 1997). Además, la fuerza máxima de las M, 1-RM en flexión de codo y en extensión de rodilla, expresada en relación a la masa muscular, ha sido establecida en el 70% y el 80% de la correspondiente a los H, y cuando se relacionan estos valores con el área de sección transversal, no se manifestaban diferencias significativas entre ambos sexos en estas acciones (Miller et al., 1993). La compleja relación entre el nivel de entrenamiento CSA y el pico de fuerza, muestran que la proporción de fuerza/CSA en entrenados H y M, es mucho más que en H y M no entrenados. Pero es muy difícil atribuir todos los cambios de la fuerza al cambio de la CSA por medio del entrenamiento. En general estudios sobre el CSA y la fuerza, indican que existe una diferencia entre sexos. Por ejemplo: M entrenadas (levantadoras de peso), han producido alta proporción de fuerza/CSA más que los H a baja velocidad de contracción (Jones et al., 2008). En resumen parece que la mayoría de evidencias

indican que, la media de los valores absolutos de fuerza en el tren superior e inferior de las M es menor de la media de los H; pero estas diferencias se manifiesten en función de la acción muscular solicitada y del sistema de medición utilizado (Fleck y Kraemer, 1997). Cuando la fuerza expresada en relación a la masa magra (muscular) o al área de sección transversal, estas diferencias se reducen significativamente. Del mismo modo por las manifestaciones de la potencia muscular, aparece el género femenino como menos capacitado que el masculino. Existen hipótesis como respuesta a la cuestión de por qué las M, generan menos potencia de los H por unidad de volumen muscular: una posible explicación sería las diferencias en el tipo de fibras musculares (Fleck y Kraemer, 1997).

Aunque en muchos estudios se ha mostrado que el área de sección transversal es menor en M, debido en parte a el tamaño pequeño de las fibras del tipo II y a las diferencias en la distribución de las fibras en comparación con los H. Tampoco está claro cómo las variaciones en las fibras musculares pueden afectar a la capacidad de rendimiento. La potencia a altas velocidades podría estar afectada si la curva de la potencia de la M fuese distinta a la del H, pero tampoco es así. Parece que el aumento en la fuerza cuando la velocidad del movimiento se incrementa es similar en los dos sexos, y que el pico de velocidad durante la extensión de la rodilla tampoco difiere entre ambos sexos. La proporción y el desarrollo de fuerza, puede afectar la potencia, al parecer, la proporción del desarrollo de fuerza del músculo esquelético, es menor para la media de las M que para la media de los H. De esta forma, la menor potencia de los músculos de la M podría ser causada en parte por una menor proporción de desarrollo de fuerza, (Staron, 2000).

## **2.8. MÉTODOS DEL ENTRENAMIENTO DE FUERZA**

Numerosas recomendaciones sobre entrenamiento de fuerza han surgido gracias a las investigaciones y el interés por la importancia del entrenamiento de fuerza sobre la capacidad funcional de los individuos. Es de suma importancia la

prescripción del ejercicio físico teniendo en mente una base científica sólida para una manipulación apropiada de las diferentes variables del entrenamiento, como la intensidad, el volumen y el tipo de ejercicio, el tipo de acción muscular, la densidad de entrenamiento, la velocidad del movimiento y la frecuencia de entrenamiento, etc.

Con dichas variables, combinadas con diferentes equipamientos, materiales, estrategias de manipulación de las cargas y los objetivos propios del programa entrenamiento, aparecieron diferentes métodos de entrenamiento como el entrenamiento con el peso corporal, con resistencias gravitacionales, Pliometría, elásticos o el entrenamiento excéntrico). A continuación se exponen que consiste cada una de estos métodos brevemente:

### 2.8.1. Ejercicio con el propio peso corporal.

El entrenamiento de fuerza con el propio peso corporal presenta una modalidad donde la única resistencia a vencer es la gravedad ejercida contra el propio cuerpo. Los ejercicios más habituales son las sentadillas, flexiones de brazos o las dominadas. Se trata de una modalidad muy versátil, por no exigir muchos materiales (aunque se puede implementar con materiales con superficie inestables, como (bosu, fitball o cintas de suspensión, o TRX) (Behm et al., 2015; Saeterbakken et al., 2011). Ésta modalidad ha demostrado inducir ganancias en la fuerza explosiva con ejercicios de (alta velocidad y baja intensidad), mejorando así la capacidad pliométrica (Jiménez-Reyes et al., 2016). Además, la implicación de numerosos grupos musculares a través de los ejercicios multiarticulares. Resulte también interesante a la hora mejorar aspectos básicos de la fuerza y el aprendizaje de la técnica correcta de ejercicios multiarticulares principalmente, por lo que resulte de gran utilidad con ciertas poblaciones como niños, personas mayores, o con patologías crónicas y/o deportistas en rehabilitación (Baechle y Earle 2008; Yamauchi et al., 2009). Su principal limitación radica en la dificultad de producir una sobrecarga o incrementar

la intensidad, y las adaptaciones producidas se orientan más hacia la mejora de la resistencia muscular (Suchomel et al., 2018).

### 2.8.2. Entrenamiento con peso libre.

Las resistencias gravitacionales a través de resistencias externas constantes, como (Mancuernas, barras, discos, mancuernas rusas o (kettlebells), y las máquinas guiadas, para desarrollar la fuerza y sus diferentes manifestaciones, son mundialmente las más utilizadas (Kraemer et al., 2017a) sea para el entrenamiento, sea para la rehabilitación y en diferentes poblaciones. Está basado en el levantamiento y en el descenso de una carga (peso) determinada., Este tipo de entrenamiento a diferencia del entrenamiento con peso corporal, permite de trabajar grupos musculares concretos a través de ejercicio monoarticulares y la ejecución de ejercicios analíticos, y que normalmente realizados con máquinas guiadas. A pesar de que ésta modalidad puede ser interesante en el ámbito de investigación y en rehabilitación, los movimientos analíticos realizados alejan de la similitud con las acciones cotidianas (Boyle. 2016). Los ejercicios multiarticulares realizados con esta modalidad han demostrado mayor ganancia en la coordinación y estabilización, y mayores ganancias de fuerza, potencia e hipertrofia (Stone et al., 2002). Con el entrenamiento de fuerza con medios gravitacionales, la intensidad, juega un papel determinante para obtener adaptaciones inducidas por el entrenamiento (Schoenfeld et al., 2017a; Schoenfeld et al., 2016b). En el entrenamiento de fuerza donde se acelere y se frena una carga externa absoluta y constante basada en un % 1-RM o en la velocidad de ejecución en un ejercicio determinado (González-Badillo y Sanchez-Medina 2010), hay que evaluar fuerza máxima dinámica antes de la prescripción del entrenamiento. El método más empleado para evaluar fuerza máxima dinámica para cuantificar la intensidad del entrenamiento es a través del porcentaje del 1-RM (% 1-RM) (Baechle y Earle 2008).

### 2.8.3. Levantamientos olímpicos.

En la preparación física con orientación al rendimiento deportivo, el levantamiento olímpico especialmente se considera una óptima alternativa para el desarrollo de la fuerza y potencia muscular. Es más empleado entre atletas por las mayores ganancias funcionales obtenidas en comparación con el entrenamiento tradicional (Arabatzi y Kellis 2012; Channell y Barfield 2008; Hoffman et al., 2004) y el entrenamiento pliométrico (Berton et al., 2018; Tricoli et al., 2005). Estos ejercicios incluyen la cargada, la arrancada o el envi3n, y durante los derivados de estos ejercicios normalmente se omiten la porci3n completa del levantamiento, (ej. el peso muerto). La principal limitaci3n de 3sta modalidad es que requiere alto nivel experiencia y un alto conocimiento de la t3cnica de ejecuci3n (Liebenson, 2014).

### 2.8.4. Entrenamiento de fuerza variable: el3sticos.

Con el estudio del patr3n cin3tico del movimiento y de las caracter3sticas mec3nicas del peso libre podemos comprender porque el empleo de una carga absoluta constante, no es un est3mulo 3ptimo para mejorar la fuerza en acciones realizadas a alta velocidad (Avrillon et al., 2017). Cuando se ejecuta con peso libre de manera explosiva se emplean cargas bajas, donde la m3xima producci3n de fuerza ocurre durante el inicio del movimiento (“momentum”) (Frost et al., 2010), y la habilidad para generar fuerza se ve disminuida a medida que se desplaza la carga y adquiere velocidad (Newton et al., 1997), resultando, por 3ltimo en una deceleraci3n al final de la acci3n conc3ntrica cuando la carga no sea proyectada (Avrillon et al., 2017; Cormie et al., 2007). As3, con intenci3n de modificar la fuerza externa y que se produce la fuerza muscular a lo largo de todo el rango de movimiento, se implementaron diferentes herramientas que han demostrado de ser eficaces como (por ej. Las bandas el3sticas). Al a3adir bandas el3sticas al peso libre, se a3ade un est3mulo de fuerza de se incrementa con el desplazamiento de la carga

(Saeterbakken et al., 2016). Varios estudios han comprobado que al inducir resistencias variables en el entrenamiento se produce mayores ganancias en la fuerza, sea en miembros inferiores como en superiores, en comparación con el entrenamiento tradicional (García-Lopez et al., 2014; Nilo Dos Santos et al., 2018; Soria-Gila et al., 2015), Además, de potenciar la producción de fuerza y el RFD (Mina et al., 2016; Mina et al., 2019).

### **2.8.5. Entrenamiento pliométrico.**

El ejercicio pliométrico es cualquier ejercicio explosivo donde se emplea ciclo estiramiento-acortamiento, es decir las acciones explosivas concéntricas potenciadas por una acción excéntrica realizada previamente, (ej. Salto en contra movimiento CMJ) (Ratamess. 2012). El entrenamiento polimétrico se realiza también mediante saltos en múltiples planos con o sin material también sobre vallas y cajones, movimientos con resistencias predefinidas (ej. una sentadilla con salto) o movimientos con lanzamiento (ej. balón medicinal), así como cayendo desde determinadas alturas se consideran también polimétricos (Ravé, y Valdivieso. 2014). Los hallazgos científicos recientes demuestran que el entrenamiento pliométrico puede producir adaptaciones similares al levantamientos olímpicos en cuanto la altura del salto vertical (Hackett et al., 2016). Los ejercicios balísticos con peso libre pueden inducir mayores ganancias de fuerza, velocidad, potencia y activación muscular a medida que se posea un alto nivel de entrenamiento, (Lake et al., 2012; Suchomel et al., 2016b).

### **2.8.6. Entrenamiento excéntrico.**

El entrenamiento excéntrico es aquel que implica acciones de alargamiento muscular como resultado de la aplicación de una fuerza decelerativa sobre una

determinada carga. Normalmente, estas acciones de deceleración ocurren cuando la fuerza aplicada es menor a la generada por la carga aplicada o cuando se realiza un alargamiento muscular voluntario (Douglas et al., 2017a; Douglas et al., 2017b). Varios métodos han sido propuestos a lo largo de la literatura científica para ofrecer un estímulo excéntrico. Entre ellos destacan el tempo/velocidad utilizado durante el entrenamiento (Dias et al., 2015; Gillies et al., 2006); el uso de cargas supramáximas y la asistencia de terceros o dispositivos que movilizan la carga durante la fase concéntrica (Fernandez-Gonzalo et al., 2011; García-López et al., 2007; Jiménez et al., 2008); cicloergómetros excéntricos y tapices rodantes en bajada (Isner-Horobeti et al., 2013; Penailillo et al., 2015); y dispositivos isocinéticos (Guilhem et al., 2013). Las adaptaciones que supone este tipo de entrenamiento han sido ampliamente estudiadas (Roig et al., 2009), en comparación con el entrenamiento concéntrico, isométrico y tradicional, se ha demostrado que podría favorecer en mayor medida cambios funcionales (fuerza, potencia y RFD), adaptaciones morfológicas (cambios en el área de sección transversal de fibras musculares y tendones), adaptaciones neuromusculares (reclutamiento de MUs, velocidad y frecuencia de activación de las mismas) y habilidades relacionadas con el rendimiento deportivo (salto vertical y velocidad de carrera) (Douglas et al., 2017a; Douglas et al., 2017b). Por lo que este método parece optimizar de manera eficaz el rendimiento (Meylan et al., 2008; Roig et al., 2008). De hecho, en la revisión de Suchomel et al., (2018) el entrenamiento excéntrico es propuesto como el mejor método para desarrollar la fuerza, la potencia y la masa muscular (tabla 1).

TABLA 1. Potencial teórico de los diferentes métodos de entrenamiento de fuerza sobre las ganancias de masa muscular, fuerza y potencia. Métodos categorizados en escala desde + (1 punto, informando de un bajo potencial), a +++++ (5 puntos, informando de un alto potencial) Adaptada de (Maroto-Izquierdo, 2019).

Método de entrenamiento	Hipertrofia	Fuerza	Potencia
Ejercicio con el peso corporal	+	+	++
Ejercicios en máquina guiada	++	++	++
Levantamientos olímpicos	+++	+++	+++++
Entrenamiento variable (elásticos)	+++++	++++	++++

Entrenamiento pliométrico	+	++	+++++
Entrenamiento balístico	++	+++	+++++
Entrenamiento excéntrico	+++++	+++++	+++++

---

## 2.9. COMPONENTES DE LA CARGA DEL ENTRENAMIENTO DE FUERZA

El entrenamiento de fuerza sin duda es, la piedra angular del entrenamiento personal. Y dependiendo de la manipulación de sus componentes directa o indirectamente va a ser determinante para lograr que el ejercicio prescrito tenga el efecto deseado en el organismo del deportista. Distinguiremos ocho componentes de la carga: intensidad, volumen, densidad, velocidad de ejecución, selección de ejercicios, orden y organización de ejercicios, frecuencia de entrenamiento, y tipo de acción muscular. Además, debemos tener en cuenta que todos ellos guardan una estrecha relación entre sí, estando íntimamente ligados unos con otros.

### 2.9.1. La intensidad de entrenamiento

Es el componente cualitativo más estudiado, y hace referencia al impacto que un estímulo tiene sobre el organismo (González-Rave et al., 2014). Por tanto, a pesar de que podría definirse como la cantidad de peso (resistencia) utilizado para un ejercicio en concreto, no sólo se refiere al “cuánto” (kg) sino también al “cómo” (potencia) (Brown, 2018). Es el mayor estímulo relacionado con cambios en la fuerza y resistencia muscular localizada. Posee cuatro características únicas (Maroto-Izquierdo, 2019):

- 1). Generalmente, su selección viene determinada por la fuerza absoluta que el individuo presenta para un ejercicio concreto. Es decir, nunca

seleccionamos una intensidad superior a la que somos capaces de movilizar ni una intensidad demasiado baja como para generar un cierto grado de estrés al organismo. (Ratamess, 2012; Schoenfeld, 2016).

2). Debe ser seleccionada de forma individual para cada ejercicio. Pues depende enormemente de las circunstancias propias de cada ejercicio: grupos musculares y articulaciones involucrados planos y ejes de movimiento, situación motriz previa, etc. Schoenfeld, 2016).

3). Presenta una relación inversa con el volumen de entrenamiento y la velocidad de ejecución. De este modo, a mayor intensidad siempre emplearemos un volumen (número de repeticiones) más bajo y una velocidad de ejecución inferior, a pesar de que la intención de movimiento sea máxima. (Brown, 2017).

4). Determina el tipo de efecto inducido por el entrenamiento. Es de sobra conocido que las altas intensidades se relacionan con adaptaciones neurales, mientras que las cargas medias se relacionan con la hipertrofia muscular y las livianas con el trabajo de potencia o resistencia muscular. (Brown, 2017).

Por ello, la intensidad es un parámetro que debe ser controlado y cuantificado durante el entrenamiento de fuerza. Esto puede realizarse mediante indicadores fisiológicos, mecánicos y psicológicos. (Ratamess, 2012). Si bien es cierto, los indicadores fisiológicos (frecuencia cardíaca, concentración de lactato en sangre, actividad electromiografía, etc.) son más propios del ámbito de investigación que del ámbito del entrenamiento personal. Aquí nos centraremos en los indicadores mecánicos y psicológicos más utilizados. (Rodríguez y Fajardo, 2010).

### 2.9.2. El volumen de entrenamiento

Se refiere a la cantidad de veces que se moviliza la carga en una sesión y para un grupo muscular en concreto (Brown, 2018). Es decir, el tiempo de duración del estímulo, y por tanto, al número de series y repeticiones. Es el componente cuantitativo más utilizado. El tiempo bajo tensión o duración del estímulo, es decir, el tiempo real sin contar las pausas de descanso, está relacionado con el número de series, y a su vez con la intensidad del estímulo. Debemos tener en cuenta que:

- No debe confundirse con el tiempo total de la sesión de entrenamiento. (Ratamess, 2012).
- Lo mejor es expresarlo en base al número de series ponderado por el número de repeticiones (ej. 4 series x 8 repeticiones x 70%1RM) (Baechle y Earle, 2007). Siempre deberá venir asociado a los demás componentes de la carga, especialmente a intensidad, tipo de ejercicio y velocidad de ejecución.
- Por si solo es un componente de la carga que carece de valor (no indica nada).

En general, hay un consenso establecido sobre una amplia base científica en cuanto al número de repeticiones por serie para lograr un determinado efecto, y del mismo modo, con suficiente evidencia podemos establecer el número de series para cada uno de los objetivos de entrenamiento. Sin embargo, a la hora de seleccionar el número de series a prescribir debemos atender a otros parámetros. Uno de esos parámetros es la experiencia del practicante. Aquellos sujetos principiantes (sin experiencia), lograrán el mayor beneficio realizando 1-2 series por ejercicio, los sujetos con experiencia intermedia lo harán entre 2 y 4 series, mientras que los sujetos experimentados lograrán el mayor beneficio cuando realicen más de 3 series por ejercicio ( Hoff, G y Triplett, T. 2018; Baechle y

Earle, 2007). Sin embargo, el número óptimo de ejercicios para un objetivo específico de entrenamiento de fuerza no se ha estudiado. Por lo general, se utiliza el número total de series de todos los ejercicios que integra la sesión para calcular el volumen total de series por sesión. La National Strength & Conditioning Association (NSCA, 2016) recomienda realizar entre 20-40 series. Por lo que generalizando podríamos establecer como número máximo de series/sesión: 30 SERIES. Aunque esto depende de (Maroto-Izquierdo, 2019):

-Intensidad. A mayor intensidad menor número de repeticiones por serie, y mayor número de series por ejercicio. (Joyce y Lewindon, 2014).

- Tipo de ejercicio elegido. Los movimientos multiarticulares se asocian a un mayor volumen en comparación con los movimientos monoarticulares. (Turner y Comfort, 2018).

- Parte o partes del cuerpo implicada (miembros superiores / miembros inferiores). Aunque es difícil encontrar diferencias en el número de series, los grupos musculares de mayor tamaño soportan un mayor número de series por sesión. Por tanto, podemos encontrar volúmenes de entrenamiento más grandes en sesiones orientadas a miembros inferiores. (Turner y Comfort, 2018; Ravé, y Valdivieso, 2014).

- Fase de la temporada: planificación. El mayor volumen de entrenamiento se ubica lo más alejado posible de la competición, tanto a nivel de mesociclos como de microciclos. (Turner y Comfort, 2018).

- Frecuencia semanal de entrenamiento y estructura de la sesión. A mayor número de sesiones a la semana, generalmente menor número de series por grupo muscular en cada sesión. Reducir el volumen por sesión y aumentar la frecuencia de entrenamiento de un mismo grupo muscular es una práctica recomendable con objetivos como la hipertrofia. (Turner y Comfort, 2018; Ravé, y Valdivieso, 2014).

- Número de series para cada grupo muscular (ejercicios principales y ejercicio coadyuvantes o auxiliares). Los ejercicios principales poseen un número de series por sesión mayor que los ejercicios coadyuvantes o auxiliares. (Turner y Comfort, 2018; Ravé, y Valdivieso, 2014).
- Nivel de entrenamiento. Generalmente, o sujetos con mayor experiencia en el entrenamiento pueden realizar un número de series por ejercicio más grande, aunque esto a su vez depende del objetivo del entrenamiento. (Turner y Comfort, 2018; Ravé, y Valdivieso. 2014).
- Objetivo del entrenamiento. Como hemos visto, los objetivos que se asocian a intensidades de entrenamiento mayores emplean a su vez un mayor número de series en comparación con objetivos que emplean cargas medias o bajas y un mayor número de repeticiones en cada serie (por ejemplo, hipertrofia y resistencia muscular). (Bompa, y Buzzichelli, 2019).

Cuando hablamos de volumen, inherentemente hablamos de intensidad, y uno de los puntos clave a tener en cuenta en la prescripción del entrenamiento de fuerza es la relación volumen-intensidad. Tradicionalmente, esa relación ha tenido un carácter máximo. Prescribiendo el máximo número de repeticiones posibles con una intensidad dada (Baechle y Earle, 2008). Esto se conoce como “entrenamiento al fallo”, y consiste en ejecutar todas las repeticiones posibles con una determinada carga (intensidad en Kg) hasta que la ejecución técnica se ve alterada por la fatiga neuromuscular (cambios en el patrón de movimiento y en parámetros cinéticos y cinemáticos, por ejemplo, una disminución significativa en la velocidad concéntrica media) o el sujeto es incapacidad de completar el rango de movimiento completo (Schoenfeld y Grgic, 2019). Sin embargo, y a pesar de su alta recurrencia en el ámbito del entrenamiento personal, el entrenamiento al fallo ha demostrado no solo no poseer mayores beneficios ni para el desarrollo de la fuerza ni para aumentar la hipertrofia muscular en comparación con el entrenamiento de fuerza en el que se dejan 2-3 repeticiones en reserva, sino que además, ha demostrado inducir una mayor

fatiga neuromuscular, una peor recuperación post-entrenamiento y un mayor riesgo de lesión (Grgic et al., 2021; González-Hernández et al., 2021). Por lo que, excepto en momento muy concretos de la planificación y, especialmente cuando no converge con otras formas de entrenamiento, podrá usarse únicamente con sujetos jóvenes y sanos (Schoenfeld y Grgic, 2019). Estos hallazgos suponen que para optimizar el estímulo neuromuscular propio del entrenamiento de fuerza y favorecer una óptima recuperación muscular, el número de repeticiones debe prescribirse en relación con el objetivo del entrenamiento, (Schoenfeld, 2016; Schoenfeld y Grgic, 2019), teniendo en cuenta que el sujeto debe ser capaz de realizar al menos una o dos repeticiones por encima de las prescritas con una carga dada. Otro aspecto importante desde la perspectiva del volumen es la organización de las series dentro de la sesión de entrenamiento. (Rodríguez y Fajardo, 2010). Recientemente se ha establecido que un mayor volumen semanal (número total de series) repartido en varias sesiones a la semana, es decir sesiones de entrenamiento constituidas por un menor número de series por grupo muscular, es más beneficioso que, un volumen semanal menor en el que todas las series de un mismo grupo muscular se concentran en la misma sesión (Rodríguez y Fajardo, 2010; Schoenfeld, et al., 2017) . Especialmente cuando el objetivo del entrenamiento es la hipertrofia muscular. Por ejemplo, un sujeto que semanalmente realiza 12 series de entrenamiento de la musculatura isquiosural pero repartida en 3 sesiones (4 series al día, 3 días/semana), tendrá mayores ganancias de masa muscular y fuerza que un sujeto que realiza 9 series (3 series de 3 ejercicios 1 día/semana) en una única sesión. (Schoenfeld, 2016; Schoenfeld y Grgic, 2019)

### **2.9.3. La densidad de entrenamiento**

Relación entre el tiempo de trabajo y el tiempo de descanso. Generalmente definido como el tiempo de descanso prescrito entre series y ejercicios (Bompa, y Buzzichelli, 2019). El tiempo de descanso influye directamente en la respuesta hormonal, metabólica, cardiovascular e inmune, por lo que su control y

monitorización resulta relevante para el entrenamiento. Generalmente, la densidad viene determinada por la intensidad y el volumen. Así, para las altas intensidades de entrenamiento (mayores del 80% 1-RM), (Schoenfeld, 2016; Schoenfeld y Grgic, 2019; Ratamess. 2012), destinadas a mejorar la fuerza máxima y la fuerza explosiva, asociadas a volúmenes bajos (pocas repeticiones), se usan descansos amplios, de entre 2 y 5 minutos. Mientras que los ejercicios que se prescriben con intensidades medias (entre el 60 y 80% 1-RM) con el objetivo de desarrollar la masa muscular, generalmente emplean descansos de 30 a 90 segundos entre series. (González-Badillo y Gorostiaga, 2002; Latella et al., 2019). Y por último, los ejercicios destinados a mejorar la resistencia muscular, en los que se prescriben intensidades inferiores al 60% 1-RM con volúmenes grandes (más de 15 repeticiones) requieren de descansos interserie de 30 segundos o menos. Aunque la densidad también puede venir determinada por la selección de ejercicios. En este sentido, con objetivos de aumento de la fuerza, se propone un periodo de descanso más amplio (de 3 a 5 minutos), (Schoenfeld, 2016), cuando los ejercicios prescritos son multiarticulares, y ligeramente inferior cuando los ejercicios seleccionados son de tipo mono-articular (Baechle y Earle, 2007). También, debemos tener en cuenta la experiencia del sujeto en el entrenamiento. Los sujetos menos experimentados, generalmente considerados de experiencia intermedia (de 6 meses a 1 año de experiencia) emplearán intensidades ligeramente inferiores en comparación con sus homólogos de más experiencia, por lo que el tiempo de descanso entre series puede ser menor, a pesar de prescribir ejercicios multiarticulares con el objetivo de desarrollar la fuerza. (Brown, 2018; Hoff G y Triplett T, 2018) En estos casos, el periodo de descanso puede ser ligeramente inferior, entre 2 y 3 minutos. Por otro lado, cuando hablamos de densidad también demos abordar la densidad intraserie, respondiendo a la pregunta: “¿se puede descansar entre repeticiones?”. La respuesta es SÍ. Utilizando la metodología “clúster” o “series rotas, podemos continuar realizando la serie sin perder cualidades cinéticas ni cinemáticas en cada una de sus ejecuciones, usando pequeños descansos para optimizar el entrenamiento”. (Bompa y Buzzichelli, 2019). Esta metodología consiste en incluir pequeños descansos intraserie (generalmente

inferiores a 20 segundos) con la finalidad de atrasar la aparición de la fatiga neuromuscular y que esta no suponga un detrimento sobre el rendimiento del ejercicio, evitando pérdidas de velocidad o repeticiones fuera del rango óptimo de intensidad que define el objetivo del entrenamiento (Latella et al., 2019). De este modo, podemos organizar cada serie de entrenamiento en bloques de 1 a 5 repeticiones incluyendo descansos breves (de 5 a 20 segundos) entre repeticiones o entre bloques de repeticiones (Turner, 2018; Turner y Comfort, 2018).

#### **2.9.4. La velocidad de ejecución**

Cuando hablamos de la velocidad de ejecución nos referimos a la velocidad media, máxima o media propulsiva con la que se moviliza una carga en relación a la velocidad máxima posible para esa carga en ese movimiento (Blazevich, 2017). La velocidad de ejecución afecta a las características de la contracción muscular:

- Influye en la actividad neural (frecuencia de estímulo, cambios en el modelo de reclutamiento y mejora la sincronización y mayor reclutamiento). (Turner, 2018; Turner y Comfort, 2018).
- Influye en la estructura (estimula la hipertrofia selectiva de las fibras tipo II). (Turner, 2018; Turner y Comfort, 2018).

Como componente de la carga, la velocidad de ejecución es un parámetro que nos permite optimizar el estímulo neuromuscular propio del entrenamiento de fuerza. Para ello debemos promover que ésta sea siempre la más alta posible, al menos en la fase concéntrica del movimiento. Esto es debido a tres aspectos fundamentales (González-Badillo y Gorostiaga, 2002; Ratamess, 2012):

- Mayor similitud con las acciones musculares de la práctica deportiva. Es esencial asegurar una similitud entre la velocidad de competición y de entrenamiento. Entrenar a baja velocidad mejorará la fuerza a baja

velocidad, pero no la fuerza a alta velocidad. (Weinek, 2005; Schoenfeld, 2016).

- Constituye una forma de intensificación del entrenamiento. A una carga determinada sólo se le saca el máximo partido si la INTENCIÓN DE MOVIMIENTO es máxima. Es decir, cuanto más próxima es la velocidad de ejecución a la velocidad máxima que un sujeto es capaz de desarrollar con esa carga, mayor es la intensidad y el efecto neuromuscular. (Weinek, 2005; Hoff G y Triplett T, 2018).

- Los movimientos realizados a una MENOR velocidad de la que el sujeto es capaz de realizar para una misma carga suponen una disminución de la fuerza rápida (implicando en mayor medida a las fibras tipo I). Algo que no nos interesa, especialmente cuando trabajamos con deportistas. Por tanto, debemos solicitar al participante que la velocidad siempre sea la máxima posible para cada repetición. (González-Badillo y Gorostiaga, 2002).

Los parámetros más estudiados y que debemos prestar atención cuando cuantificamos la velocidad de ejecución son la velocidad media concéntrica, la velocidad media propulsiva y la velocidad máxima, tanto concéntrica como excéntrica. (Aunque esta última es menos empleada, nos permite cuantificar el uso del ciclo de estiramiento-acortamiento y la posible sobrecarga excéntrica existente), (González-Badillo y Gorostiaga, 2002). Pero, con independencia del parámetro analizado, el dato más estudiado es el índice de fatiga, es decir, la pérdida de velocidad intra-serie que acontece en cada repetición de la serie desde la repetición con las mejores características cinéticas. (Turner, 2018; Turner y Comfort, 2018). Esto permite que el índice sea mostrado al deportista porcentualmente e incluso que prescribamos el volumen en base a la pérdida de velocidad porcentual permitida. Además, podemos equiparar la velocidad de ejecución con la intensidad porcentual, bien mediante un estudio del perfil fuerza-velocidad del sujeto para ese ejercicio o por medio de las tablas de equivalencia existentes en la literatura para los ejercicios

multiarticulares más utilizados (por ejemplo, el press banca). En cualquier caso, debemos verlo como una forma de motivación para que el sujeto sea capaz de desarrollar cada repetición con la máxima intención de movimiento. (González-Badillo y Gorostiaga, 2002).

## **2.10. LIMITACIONES DE LOS MÉTODOS DEL ENTRENAMIENTO DE FUERZA**

Tradicionalmente, el entrenamiento de fuerza ha sido prescrito con cargas gravitacionales, lo que ha dado lugar a una metodología de entrenamiento basada en la fuerza máxima relativa para un determinado ejercicio, siempre teniendo en cuenta el objetivo del entrenamiento. De este modo, la combinación de los diferentes componentes de la carga, como hemos visto anteriormente, nos permite distinguir entre métodos orientados al aumento de la fuerza, a la ganancia de masa muscular, al incremento de la fuerza explosiva o a la mejora de la resistencia muscular. Es decir, un mismo ejercicio puede permitirnos múltiples efectos, pero la combinación concreta de volumen, intensidad, descanso, velocidad de ejecución, etc., dará lugar a unos u otros resultados. Sin embargo, a pesar de que esta metodología nos permite distinguir fácilmente el objetivo de la sesión y ser relativamente precisos en nuestra prescripción, se trata de una metodología que presenta importantes limitaciones. Las más destacadas las podemos sintetizar en los siguientes puntos:

1. Es una metodología basada en el 1-RM. Esto exige medir, o al menos estimar, el 1RM del usuario para cada ejercicio. Además, el hecho de usar esta metodología implica el entrenamiento al fallo, lo cual ha demostrado inducir un importante detrimento sobre la recuperación muscular y no supone efectos mayores que los encontrados tras el entrenamiento en el que no se llega a este límite, además de estar contraindicado para determinados contextos poblacionales. (González-Badillo y Gorostiaga, 2002).

2. No se trata de un estímulo funcional, es decir, es poco específico con los gestos deportivos y actividades cotidianas. Ya que muchos ejercicios se realizan sentados, siendo el propio medio de entrenamiento quien aporta la estabilidad y por la acción única de una sola articulación y en un solo plano de movimiento. Algo que se aleja mucho de la realidad cotidiana o deportiva donde se compite con los pies en el suelo, en un ambiente o contexto cambiante, donde el sujeto debe ser quien aporte la estabilidad y en el que varias articulaciones intervienen al mismo tiempo para desarrollar la tareas motrices generalmente multiplanares (Boyle, 2016; La Scala Teixeira et al., 2017).

3. La necesidad de peso libre. Su aplicación se basa únicamente en el uso del peso libre como medio de resistencia durante el entrenamiento. Lo que limita enormemente su aplicación, especialmente en contextos de entrenamiento personal en los que no tenemos a nuestro alcance un gimnasio (por ejemplo, entrenamientos domiciliarios o al aire libre), (Weinek, 2005; Hoff G y Triplett T, 2018).

4. La intensidad concéntrica limita la intensidad excéntrica. Debemos ser conscientes de que el entrenamiento basado en el 1-RM se basa en la capacidad del sujeto para movilizar (acelerar) una determinada masa, sin embargo, no atiende a la capacidad del sujeto para decelerar o frenar una resistencia dada. Debido a las ya descritas características musculares, este hecho subestima a la acción excéntrica otorgando un carácter submáximo al entrenamiento con peso libre en el que la acción excéntrica no se ve acentuada (Maroto-Izquierdo, 2019).

5. Requiere mucha experiencia previa. Inicialmente debemos invertir tiempo en trabajar la técnica de los ejercicios que integrarán el programa para posteriormente trabajarlos con cargas progresivas submáximas. Esto hace que no sea aplicable con sujetos no entrenados o principiantes, o que únicamente podamos aplicar métodos concretos.



### 3. EJERCICIO EXCÉNTRICO: ORIGEN, BASES Y CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS

Antes de estudiar los efectos del ejercicio excéntrico, la fisiología del ejercicio centró su estudio en investigar sobre el trabajo concéntrico o isométrico, especialmente la función contráctil de la fibra muscular y el tipo de acciones musculares. El término “excéntrico” fue introducido por primera vez por el fisiólogo Asmussen, en 1953, al combinar el prefijo “ex” (desde o fuera de ella), con la palabra “céntrica” (centro), definiendo una contracción muscular que “se alejaba del centro del músculo”, y que por tanto daba nombre a las acciones musculares en las que se produce tensión al mismo tiempo que el tejido muscular se elonga. Sin embargo, fue a finales del siglo XIX, cuando Flick, en 1882, observó que un músculo podía ejercer mayor fuerza cuando se estira que cuando se contrae. Posteriormente, Hill y colaboradores, en 1938, demostraron que la liberación de energía en el músculo al elongarse era menor de la liberada al contraerse (Lindstedt et al., 2001). La primera demostración práctica fue presentada por Bud, Biglan y Murdoch en 1952, con dos bicicletas estacionarias, unidas por una sola cadena, con los respaldos de los sillones colocados de manera opuesta, donde un sujeto A pedaleaba hacia adelante ejecutando acciones puramente concéntricas, mientras el sujeto B se oponía a este movimiento, trabajando excéntricamente, observando que el gasto energético y el esfuerzo era mucho menor en el sujeto B. Posteriormente, se acuñó el término de trabajo negativo para este tipo de acción (Faulkner, 2003; Ratamess, 2012).

Una acción excéntrica, ocurre cuando el momento de fuerza creado por la acción muscular sobre cualquier extremo de una articulación se produce en dirección opuesta al movimiento angular de la palanca (Lindstedt et al., 2016), por ejemplo, cuando los flexores son activados y ocurre el movimiento de extensión, creando un trabajo mecánico negativo, que resulta en una disminución de la energía cinética y/o potencial. Dicho de otra manera, el músculo se alarga bajo la tensión causada por una fuerza opuesta, la cual es más grande que la tensión generada por el propio músculo

(Bubbico y Kravitz, 2010). Un ejemplo cotidiano es cuando subimos y bajamos una escalera, en la primera, para subir se llevan a cabo acciones concéntricas, debido a que los músculos extensores de rodilla se están acortando, mientras que en la segunda, para bajar la escalera, se realizan acciones excéntricas frenando la acción de la gravedad sobre el propio cuerpo, ya que lo que los músculos se alargan. Una acción excéntrica también ocurre cuando la velocidad del movimiento de una extremidad es negativa (decelerando), o su posición está siendo disminuida lentamente, produciendo una acción de frenado (McGinnis, 2004), donde el brazo de potencia producido por la tensión de los elementos contráctiles y elásticos y la distancia del eje articular es menor que el brazo de resistencia a vencer (Kraemer y Vingren, 2007; Lindstedt et al., 2001). Siendo, por tanto, cuando el músculo aumenta su longitud. En la fase de descenso, durante la marcha controlada y a baja velocidad, los puentes cruzados de actina y miosina ejercen una fuerza de una magnitud suficiente como para disminuir la velocidad del movimiento, pero insuficiente para detenerlo o elevarlo. En el trabajo se realiza mientras las fibras se alargan bajo tensión, el músculo absorbe la energía mecánica (disipada en forma de calor) y reduce la energía cinética (conservándola o manteniéndola como energía potencial elástica para la acción concéntrica subsecuente) (Lindstedt et al., 2001; Lindstedt et al., 2016; Roig et al., 2008). Los estudios de Abbott y colaboradores (1952) y de Abbott y Bigland (1953), al inicio de los años 50, dieron lugar a contribuciones conceptuales que aportaron más evidencia sobre las particularidades del trabajo negativo, y también evidenciaron otras propiedades conocidas en la actualidad sobre la acción muscular excéntrica (Hortobágy, 2003). A finales de los años 80 y al inicio de los años 90 varios estudios fueron realizados por la Administración Nacional Aeronáutica y Espacial norte americana, (National Aeronautics and Space Administration, NASA), y el Instituto Karolinska de Estocolmo (Suecia), para encontrar una solución a la pérdida de la masa muscular de los astronautas en el espacio por la falta de gravedad, y el largo tiempo de en el espacio con tal condiciones, fomentando un crecimiento exponencial en el interés por la importancia de las acciones excéntricas en las

adaptaciones neuromusculares posteriores al entrenamiento de la fuerza (Dudley et al., 1991; Hather et al., 1991).

Los tipos de contracción muscular utilizados en nuestra prescripción deben, por tanto, contemplar la acción muscular, pues los efectos y adaptaciones de las diferentes formas de entrenamiento basadas en el tipo de contracción existente son distintos. Tradicionalmente, el entrenamiento de fuerza se ha prescrito en base a la fuerza máxima absoluta del sujeto. De este modo, prescribimos una determinada intensidad en base a la capacidad del sujeto de movilizar (levantar) una resistencia dada. Es decir que la acción concéntrica se prescriba a una determinada intensidad relativa respecto a su fuerza máxima absoluta para ese ejercicio y que, de este modo, pueda ser fácilmente cuantificable. (Lindstedt et al., 2001). La habilidad para producir fuerza en la acción concéntrica limita la intensidad utilizada durante el ejercicio de fuerza esto hace que subestimamos a la acción excéntrica subsecuente. Lo que implica que la intensidad utilizada durante el entrenamiento tradicional con peso libre no sea óptima durante la fase excéntrica del movimiento, (Ortega et al., 2015). Puesto que la capacidad para desarrollar fuerza entre las acciones concéntricas y excéntricas es diferente en cada ejercicio, siendo siempre superior la fuerza desarrollada en una contracción excéntrica cuando se compara con una contracción concéntrica en el mismo ejercicio (Maroto-Izquierdo et al., 2021). Esto es debido a que la acción excéntrica se refiere a la actividad neuromuscular que ocurre cuando la resistencia aplicada excede la fuerza generada por el músculo (Maroto-Izquierdo et al., 2017). Por tanto, el entrenamiento excéntrico inducirá un estrés y una tensión que supondrán un estímulo único y novedoso. La repetición sistemática de este estímulo ha demostrado inducir importantes beneficios. Este hecho ha supuesto que numerosas investigaciones analicen el estímulo excéntrico y sus diferencias con el ejercicio tradicional basado en la capacidad para levantar un peso (Lindstedt et al., 2001). A pesar de que no se han encontrado grandes diferencias entre el entrenamiento aislado excéntricamente y el entrenamiento aislado concéntricamente sobre las adaptaciones generadas en fuerza y masa muscular o las diferencias son ligeramente superiores a favor del entrenamiento (Franchi et al., 2017;

Schoenfeld et al., 2017; Wernbom et al., 2007), numerosos estudios han resaltado la importancia de incluir una fase de frenado durante el entrenamiento de fuerza como requisito para amplificar los efectos agudos y adaptaciones crónicas inducidas por este tipo de entrenamiento (Douglas et al., 2017). Douglas et al., (2017a), han establecido que las ganancias en variables relacionadas con la fuerza son claramente específicas del modo de entrenamiento empleado (siendo más favorables para el entrenamiento excéntrico). Estas adaptaciones surgen como resultado de cambios neutrales, morfológicos y estructurales:

- Tras un periodo de entrenamiento aislado excéntricamente, la fuerza excéntrica aumenta debido a un incremento en la conducción nerviosa del músculo agonista al mismo tiempo que disminuye la coactivación del antagonista, debido a un reclutamiento de UMs específico de la acción excéntrica (Aagaard et al., 2003).

- Este reclutamiento específico de la acción excéntrica, tras un periodo de entrenamiento, supone un incremento en la capacidad para reclutar MUs grandes (tipo IIx y IIa) más rápidamente y a disminuir el umbral de reclutamiento y aumentar la frecuencia del impulso (Cormie et al., 2010). Esto, contribuye a un mayor aumento en el rendimiento del ciclo de estiramiento-acortamiento (potencia concéntrica (Elmer et al., 2012; Gross et al., 2010) y RFD (Blazevich et al., 2008).

- Además, el rendimiento neuromuscular de carácter explosivo (aplicación rápida de fuerza) también se ve mejorado por los cambios que el entrenamiento excéntrico induce en el tejido conectivo elástico. Así, aumentos en la rigidez del tendón (Malliaras et al., 2013) y en su área de sección transversal (Farup et al., 2014) han sido descritos como una probable vía de almacenamiento de energía y de utilización de esa energía elástica, permitiendo al músculo operar más cerca de su longitud y velocidad de acortamiento óptimas (Ando et al., 2018).

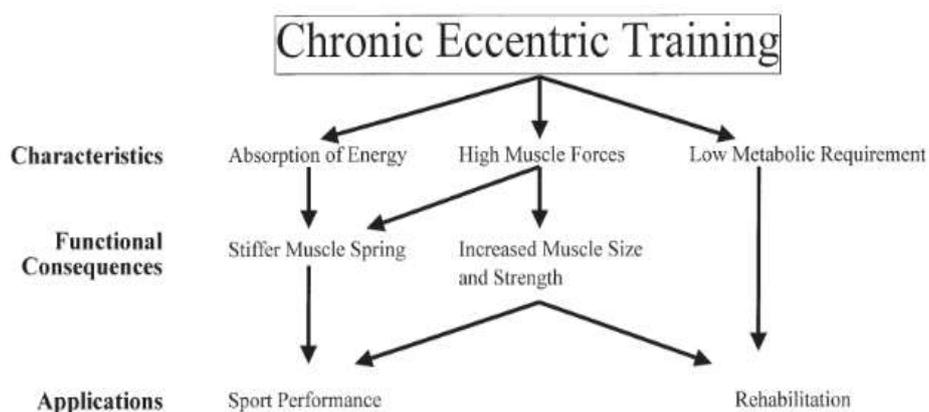
- Algunos autores han incidido en la importancia del entrenamiento excéntrico en las ganancias de volumen muscular. Si bien, los mecanismos por los que la hipertrofia tiene lugar no han sido ampliamente descritos (Schiaffino et al., 2013). Sin embargo, existe evidencia científica de que a tensión inducida por el estiramiento

y los altos niveles de tensión mecánica a los que las (UMs) activas son sometidas (Fry, 2004; Toigo y Boutellier, 2006), junto con la mayor presencia de daño muscular después del ejercicio excéntrico (García-López et al., 2007; Jiménez-Jiménez et al., 2008), caracterizan la capacidad del entrenamiento excéntrico para generar una mayor respuesta anabólica en comparación con el entrenamiento tradicional puramente concéntrico (Schoenfeld, 2010).

- La hipertrofia muscular ha demostrado no ser homogénea en todo el músculo y la región en la que se produce en mayor medida depende del estímulo otorgado con el entrenamiento. Siendo predominante en las regiones medias y distales del músculo tras el entrenamiento excéntrico, mientras que tiene lugar en mayor medida en el vientre muscular tras el entrenamiento concéntrico (Franchi et al., 2014). Además, el entrenamiento excéntrico implica cambios en la longitud de los fascículos (aumentando su longitud) y una mayor presencia de sarcómeros en serie (Blazevich et al., 2007; Franchi et al., 2014). Esto va a permitir una mayor velocidad de acortamiento muscular y un aumento de producción de fuerzas a mayores longitudes musculares (Franchi et al., 2017). Estas diferencias en la respuesta hipertrófica pueden ser explicadas a nivel molecular, pues a pesar de que las vías AKT-mTOR y MAPK son vías de señalización de la síntesis proteica, únicamente la vía MAPK (proteínas p-38 MAPK, ERK 1/2, y p90RSK) fueron alteradas después del entrenamiento excéntrico (Franchi et al., 2014).

- El entrenamiento excéntrico también parece tener una incidencia directa en el área de sección transversal CSA y en la distribución de las fibras rápidas tipo II, (Friedmann et al., 2010; Hather et al., 1991; Hortobagyi et al., 2000). Sin embargo, aunque existe evidencia del mayor efecto que posee el entrenamiento excéntrico aislado en comparación con el entrenamiento concéntrico aislado, existe una cierta controversia. En numerosas revisiones, como son las de Wernbom (2007), Roig (2009), Schoenfeld (2017b) y Franchi (2017) no se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el área de sección transversal del músculo entre ambos tipos de entrenamiento. Con respecto a la fuerza, a pesar de que varios

artículos científicos han demostrado que existen mayores ganancias en la “fuerza total” después del entrenamiento aislado excéntrico, esto es debido a que las ganancias de fuerza excéntrica después del entrenamiento excéntrico son muchos mayores que las ganancias concéntricas después del entrenamiento puramente concéntrico. De hecho, los efectos sobre la fuerza isométrica no muestran diferencias. Por tanto, existe una adaptación específica, pero no una clara ventaja de un método sobre el otro en el desarrollo de la fuerza. Por lo que, a pesar de que existe una cierta evidencia de superioridad del entrenamiento excéntrico aislado sobre algunas variables, la evidencia general de supremacía de este tipo de entrenamiento no es consistente. Sin embargo, Sí que existe un claro consenso en la importancia de la



incorporación de acciones excéntricas en el entrenamiento de fuerza. No obstante, numerosos estudios han destacado la importancia de las características fisiológicas únicas que presenta la contracción excéntrica, y que hacen que la inclusión de una fase de frenado durante el entrenamiento de fuerza sea un requisito para amplificar los efectos agudos y las adaptaciones crónicas inducidas por el entrenamiento con resistencias.

Figura 7. El entrenamiento excéntrico crónico y sus adaptaciones musculares que tienen efectos significativos para su aplicación tanto en la rehabilitación como en el deporte. (Lindstedt et al., 2001).

### 3.1. CARACTERÍSTICAS DIFERENCIALES DE LAS ACCIONES EXCÉNTRICAS RESPECTO DE LA CONCÉNTRICAS

Todo ello implica que la contracción excéntrica tenga unas 6 características únicas (Maroto-Izquierdo, 2019). De hecho, Sergio Maroto-Izquierdo, desde una perspectiva puramente fisiológica, estas 6 características sirven para definir la contracción excéntrica y explicar las diferencias con la contracción muscular concéntrica e isométrica:

#### 1). Capacidad de producir mayores picos de fuerza:

En la literatura científica son muchos los estudios que demuestran que las acciones excéntricas son capaces de generar mayor tensión que las acciones concéntricas (Doss y Karpovich, 1965; Komi y Buskirk, 1972) En el trabajo de Doss y Karpovich (1965, citado por Middleton y Montero, 2004; García-López, 2008; de Souza y de Paz, 2012) donde compararon la fuerza producida por los tres tipos de acciones musculas, por los flexores del codo, mediante dinamometría isocinética, encontraron que la fuerza producida por la acción excéntrica fue 13.5% mayor que la isométrica y un 39.7% mayor que la concéntrica. Komi (1986), en su trabajo evidencia que una contracción excéntrica puede generar una tensión en torno al 20-30% mayor que la generada por una contracción isométrica(al mismo nivel de activación). La contracción excéntrica es capaz de producir un 20-30% más de fuerza que una contracción isométrica con el mismo nivel de actividad electromiográfica. Durante acciones dinámicas con peso libre (Hollander et al., 2007), o con dispositivos isocinéticos (Colliander y Tesch, 1990) Los datos antemencionados, en la segunda mitad del siglo XX son estudios que demuestran, la superioridad de la acción excéntrica en generar mayor tensión en comparación con las acciones isométricas y concéntricas (Guilhem, et al., 2010). Otros estudios con diferentes medios y diferentes formas de ejercicios, demostraron la existencia de los mayores índices de producción de fuerza durante las acciones excéntricas en comparación con las

concéntricas (Colliander y Tesch, 1990; Westing et al., 1991). Otra evidencia se mostró en el interesante trabajo de Hollander et al., (2007), donde las diferencias de fuerza máxima dinámica entre las acciones concéntricas y excéntricas fue determinada en seis ejercicios diferentes sea en H sea en M jóvenes; utilizando máquinas de musculación aislando la fase excéntrica y la fase concéntrica de los ejercicios, además las acciones fueron evaluadas en los miembros superiores e inferiores. Los resultados mostraron valores de fuerza excéntrica superiores que la concéntrica en todos los ejercicios, un 20-60% mayor que en la concéntrica, y gran variabilidad inter-ejercicios en las diferencias de fuerza y un mayor ratio excéntrico / concéntrico acentuándose aún más este porcentaje en mujeres (60-160%), (Colliander y Tesch, 1990).

Aunque las posibles explicaciones para la generación de altos picos de fuerza excéntrica no son del todo claros, este puede tener una explicación basado sobre el funcionamiento de los puentes cruzados. Cuando un músculo se alarga activamente desde una situación isométrica, los puentes cruzados unidos son estirados aumentando así la tensión media generada por cada puente cruzado, y después de cierto grado de estiramiento se produce un desacoplamiento y un rápido acoplamiento (200 veces más rápido que durante acciones isométricas). De esta manera el pequeño rango de rigidez muscular que se produce al inicio de la contracción excéntrica, se debe al aumento de la tensión media, producida por cada puente cruzado. Con el alargamiento continúe, los puentes se acoplan rápidamente, lo que hace que, la producción de fuerza durante el alargamiento muscular se incrementa de manera proporcional a la velocidad de contracción (Douglas et al., 2017b). Produciendo una gran tensión muscular. (Izquierdo, 2008). Otra explicación puede ser desde el punto de vista del mecanismo de reclutamiento de fibras musculares antes mencionado, que permite incorporar preferentemente fibras tipo IIx y una mayor implicación de las propiedades visco- elásticas del músculo (Hortobágyi et al., 1996; Meylan et al., 2008), lo que también se ve reflejado en un retraso en la aparición de la fatiga (García-López, 2008; Ratamess, 2012). Con los factores antes mencionados y el menor coste energético permiten optimizar la intensidad y generar mayor carga de trabajo en este tipo de acción muscular (Meylan

et al., 2008; Roig et al., 2008). En general durante las acciones excéntricas se acepta que hay una mayor producción de fuerza relativa, a pesar de la ligera menor actividad superficial electromiografía EMG en comparación con las acciones musculares concéntricas, Este hecho se debe probablemente al menor reclutamiento relativo, las tasas de descarga de las unidades motoras activas secundaria, la eficiencia mecánica superior, y a la disipación de energía de las acciones musculares excéntricas.

## 2). Menor La actividad muscular durante las acciones excéntricas

La actividad eléctrica muscular EMG o el grado de activación muscular de las acciones excéntricas fue también el objeto de estudio comparándolo con otros tipos de acciones. Se observó que las acciones excéntricas implican la activación de un número de unidades motoras menor para lograr un nivel específico de tensión (Komi et al., 1987), las cuales pueden llegar a ser sólo de una tercera a una sexta parte de las acciones concéntricas, incluso cuando la producción de fuerza es mayor (Duchateau y Baudry, 2014).

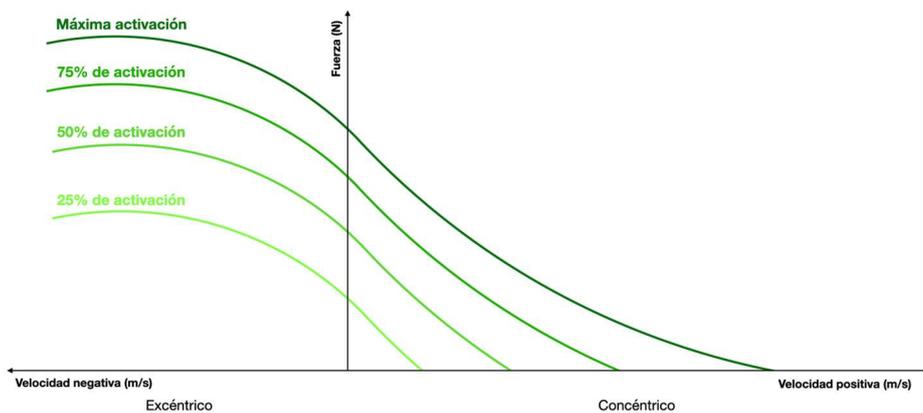


Figura 8.- Curvas fuerza-velocidad a diferentes niveles de activación muscular. Adaptado de (Reeves et al., 2009).

Como muestra la figura (8), a un nivel de activación del 50% de acción excéntrica, corresponde a un nivel de activación del 75% de acción concéntrica. En la opinión de Enoka (1996) este fenómeno se debe a dos factores, un menor nivel de activación de todas las motoneuronas y, un menor número de motoneuronas implicadas. Para Duchateau y Enoka (2008) debido a la capacidad de producir más fuerza durante las acciones excéntricas, el número de unidades motoras reclutadas es menor, y la velocidad de descarga es más baja durante las acciones excéntricas comparadas con las concéntricas, y durante las acciones excéntricas máximas, la activación muscular en comparación con las acciones concéntricas e isométricas se reduce, y requieren de una distinta estrategia de activación del sistema nervioso, que lo permite de maximizar dicha actividad, preservando la salud de las unidades motoras de alto umbral (Enoka, 1996), al parecer esto sucede porque este tipo de acciones son de mayor complejidad (Fang et al., 2001), además durante las acciones excéntricas hay un reclutamiento de las unidades motoras de manera selectiva optando por las unidades motoras rápidas (Enoka, 2002). Otro factor puede ser el mecanismo inhibitor que se activa para proteger contra la tensión muscular extrema. Westing et al., 1990 citado por (Farthing y Chilibeck, 2003) utilizando la estimulación eléctrica durante acciones máximas voluntarias, (durante la extensión de la rodilla, con nueve varones bien entrenados, entre 19-43 años de edad) encontraron un incremento en el torque de fuerza durante la acción excéntrica máxima, sin influencia por la estimulación “extra”, con las acciones concéntricas e isométricas máximas, posiblemente por una menor activación de los músculos agonistas (Rutherford et al., 2001, citado por Lindstedt, 2001). En un estudio de Westing et al., (1991), con catorce sujetos, realizando acciones excéntricas y concéntricas voluntarias máximas, a velocidad constante, de los flexores de rodilla, y encontraron una actividad EMG menor a pesar de que el torque era mayor durante las acciones excéntricas, En otro estudio realizado por Babault et al., (2001) sin diferencia significativa en la fuerza pico durante las acciones voluntarias máximas, sin embargo, el nivel de activación concéntrica decaía el nivel de fuerza en las acciones excéntricas, se mantenía constante. Por su parte Aagaard et al., (2000), después de un programa de

entrenamiento de acciones voluntarias máximas fuerza (excéntrica vs concéntricas) de (14 semanas), y encontraron mayor fuerza durante las acciones excéntricas y menor la actividad EMG en comparación con las concéntricas. En otro estudio en donde la activación de siete músculos fue medida en sus fases excéntricas y concéntricas, en siete ejercicios, en cuatro de los ejercicios se encontró que la activación muscular era menor durante la fase excéntrica que la concéntrica, desde un 36% (en el recto anterior femoral) hasta un 154% (en el isquiotibial lateral) (Fauth et al., 2010). Beltman et al., (2004a) en su estudio encontraron también mayor activación muscular durante la acción voluntaria máxima excéntricas en comparación con las concéntricas e isométricas, y con ausencia de diferencias entre las concéntricas e isométricas. Shellock et al., (1991) con la imagen de resonancia magnética (MRI) también observaron que cuando se realizaban acciones concéntricas la señal se incrementaba, y durante las acciones excéntricas dicho incremento era mínimo o nulo. Sin embargo, (Fang et al., 2004), en su opinión el cerebro requiere más tiempo para llevar a cabo las acciones excéntricas lo que puede indicar que se involucra un mayor número de regiones funcionales y un mayor número de conexiones neuronales. En el mismo sentido, (Lindstedt et al., 2001), citado por (Roig y Ranson, 2007) propone que el cerebro planea y procesa de forma diferente ambos tipos de acciones (concéntricas y excéntricas). El alto nivel o magnitud del potencial positivo observado durante las acciones excéntricas, parece indicar que el cerebro durante dicho modelo de funcionamiento muscular procesa una cantidad superior de información sensorial. Owings y Grabiner, 2002, citados en, (LaStayo et al., 2003), proponen que en el Sistema Nervioso Central SNC, los comandos u órdenes son diferentes en función del tipo de acción a realizar. La literatura científica ha puesto varias propuestas para explicar la mayor producción de fuerza con menor activación muscular en las acciones excéntricas al comparar con las concéntricas e isométricas sin estar de acuerdo de manera unánime por lo cual las causas no son todavía claras del todo.

### 3). Menor coste energético de las acciones musculares excéntricas

Además de que el ejercicio excéntrico requiere un menor número de UMs activas durante el mismo, se ha demostrado que también las demandas metabólicas son menores durante el alargamiento muscular (Penailillo et al., 2013). Fue a comienzos del siglo XX cuando Chauveau (1901), observó que el consumo de oxígeno requerido para la realización de un trabajo positivo (caminando cuesta arriba) en tapiz rodante era aproximadamente el doble del mismo trabajo realizado de manera negativa (caminando cuesta abajo). El trabajo de Abbott et al., (1952), fue el estudio que más demostró esta característica. Con el famoso estudio de las dos bicicletas conectadas con única cadena y los sujetos tenían que pedalear en sentido opuesto, de modo que los dos sujetos pedaleaban realizando acciones musculares contrarias, uno de modo concéntrico y el otro frenándolo mientras realizaba trabajo excéntrico. Los autores encontraron menores valores en el consumo máximo de oxígeno  $VO_{2m\acute{a}x}$ . durante el trabajo negativo (Excéntrico) en comparación con el trabajo positivo (Concéntrico) en las distintas revoluciones (3 velocidades) del pedaleo. El primer sujeto utilizó 0,70l /min de oxígeno sobre los valores de reposo, mientras que el segundo sólo 0,17 l/min. El trabajo positivo tuvo mayor costo de oxígeno que el negativo cuando pedalearon a una velocidad de 35 rpm, la relación para las dos tareas fue de 3,7, esta relación se incrementó con la velocidad de pedaleo. Knuttgen et al., (1971) compararon el ejercicio excéntrico y el concéntrico y encontraron que el ejercicio excéntrico requería menor consumo de ( $O_2$ ) (con la misma carga de trabajo). ). O`Reilly et al., (1987) encontraron que el coste metabólico del ejercicio excéntrico es un 53-59% del coste equivalente a un trabajo concéntrico similar (con la misma carga). Bigland-Ritchie y Woods (1976), citados por (LaStayo, 2003), indicaron que los requerimientos de oxígeno del pedaleo excéntrico submáxima equivalen a  $1/6 - 1/7$  de los correspondientes al pedaleo concéntrico, ejecutado con la misma carga de trabajo. (Figura 9). Además, el consumo de oxígeno y la respuesta cardiaca también han demostrado ser menores durante las actividades que implican alargamiento muscular, como por ejemplo caminar cuesta abajo o el empleo de cicloergómetros excéntricos (Abbott et al; 1952; Vogt y Hoppeler, 2014). Esto resulta en una menor percepción de esfuerzo, concentración de lactato, energía requerida y

una mayor oxidación de grasas (Penailillo et al., 2013). Caruso et al., (2003) evaluaron el costo energético a partir del  $\text{VO}_2$  Pico y el trabajo efectuado en un dispositivo de volantes inerciales, donde los sujetos en un ejercicio de extensión de la rodilla en una acción concéntrica y en un ciclo completo incluyendo la fase excéntrica. Con la conclusión de que al incluir las acciones excéntricas, se logró aumentar el trabajo realizado en 3600 J, sin mayor coste energético añadido al que obtenido sólo para el trabajo concéntrico. En un estudio de Vallejo et al., (2006), la respuesta cardiaca y pulmonar durante la realización de ejercicios rigurosos excéntricos y concéntricos en personas mayores los resultados indicaron que durante el ejercicio submáxima excéntrico la respuesta de la frecuencia cardiaca, la presión arterial sistólica, índice cardiaco y ventilación expirada era significativamente menor comparada con el ejercicio concéntrico. Beltman et al., (2004b) encontraron que el costo energético de las contracciones EXC, era aproximadamente un 30% menor de las contracciones CON. Por cuanto atañe al menor coste energético una explicación nos da García-López, (2008), al que en su opinión, en la contracción muscular, cuando se acaba la tracción al filamento grueso de actina, es decir la desconexión de la cabeza de la miosina de los sitios activos de la actina, este acto requiere (ATP), que en las acciones excéntricas ocurre con menor demanda dado que se produce casi de modo automático mientras se da el alargamiento del sarcómero.

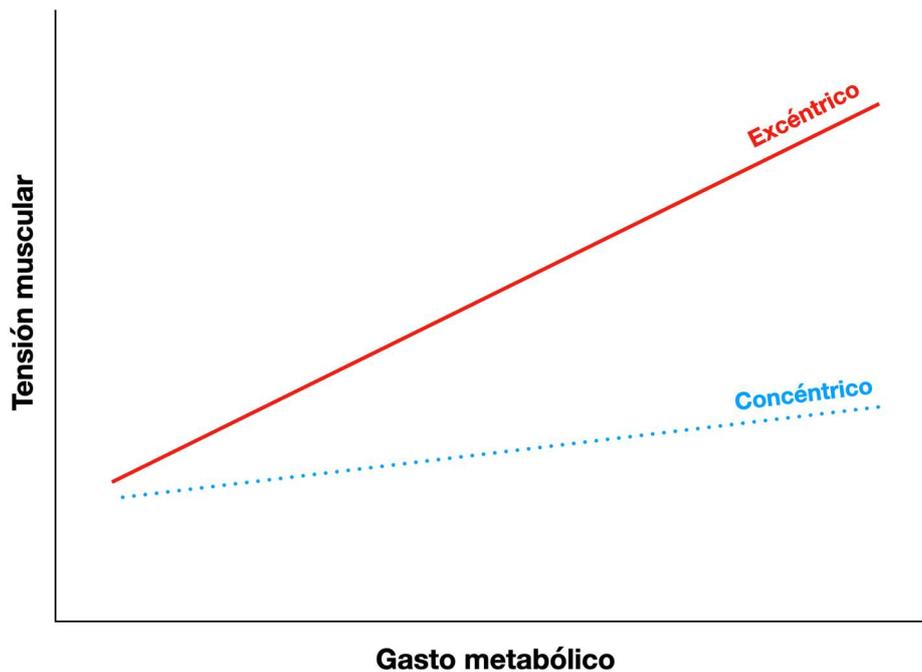


Figura 9- Gráfica que muestra la relación fuerza - gasto metabólico, comparando la contracción excéntrica con la concéntrica (Adaptado de Lindstedt et al., 2001).

#### 4). Reclutamiento específico de unidades motoras:

Existe un orden de reclutamiento según el tipo de fibras en unidades motoras UMs. El sistema nervioso regula su funcionamiento con un tipo específico de activación neural durante las acciones excéntricas en comparación con las acciones concéntricas e Isométricas. En base al principio del tamaño de Henneman, o por su nombre anglosajón (The Size Principle) al que establece que el orden de reclutamiento de unidades motoras, se activa primero las fibras Tipo I (rojas o lentas), luego las Tipo IIa u (oxidativo-glucolíticas) y por último las de Tipo IIx o (glucolíticas) para responder a una contracción de intensidad progresiva Milner et al., 1973; Milner et al., 1975). Sin embargo, hay una hipótesis que actualmente admite que el Principio de Henneman es igual para las acciones excéntricas, pero la diferencia radica en que la activación de las fibras Tipo IIx se haría de un modo más rápido y menos escalonado (Aagaard et al., 2000; Duchateau y Baudry, 2014). Algunos de los estudios que demuestran que en una contracción excéntrica se necesita un patrón de reclutamiento de UMs diferente, fue de Nardone et al. (1989) citado por Enoka (1996),

al que comprobaron que UMs no fueron reclutadas durante las contracciones concéntricas e isométricas (fibras rápidas) de los flexores plantares, pero fueron Las unidades motoras de umbral alto (fibras rápidas) reclutadas en las contracciones excéntricas como primer reclutamiento de manera selectiva. La actividad del sóleo (con predominio de fibras lentas) parecía inhibida en comparación con el Gastrocnemio (con predominio de fibras rápidas. La estrategia diferenciada del Sistema Nervioso Central SNC al programar y ejecutar una acción excéntrica en comparación con la concéntrica, Se encontró una mayor actividad cortical durante las acciones excéntricas, de los lóbulos frontal y parietal y al mismo tiempo, en contraste una baja actividad electromiografía de los flexores del codo, mientras se realizaban movimientos de flexo-extensión (Fang et al., 2001). Por tanto, este sugiera que las áreas corticales monitorizadas, parecen procesar una mayor cantidad de información sensorial, inducida por mecanismos reflejos a partir del estiramiento de los músculos; (más relacionada con la función de los husos musculares y órganos tendinosos de Golgi). Este estudio (Fang et al., 2001). También demostró que el cerebro ejecuta las acciones excéntricas con un procesamiento de información diferente al de las concéntricas donde Las UMs de mayor tamaño que agrupan fibras de tipo rápido son reclutadas más rápidamente e implican una disminución del umbral de reclutamiento y un aumento de la frecuencia de estimulación (Fang et al., 2001; Cormie et al., 2010), especialmente cuando la velocidad de contracción es rápida (Kulig et al., 2001; Guilhem et al., 2010). Esto puede ser explicado por el aumento del área de sección transversal y la distribución de las fibras rápidas (Fibras tipo Ila se convierten en fibras tipo IIx (Friedmann et al., 2010). Otra particularidad respecto al patrón neural, es la activación de un menor número de unidades motoras UMs durante una acción excéntrica, frente a una concéntrica similar, al puede ir entre un 35 y un 60% menos y se refleja en una baja actividad electromiografía, (Hortobágyi, 1996; Fang et al., 2001), Se ha sugerido que puede ser debido a una imposibilidad del SNC para activar completamente las unidades motoras implicadas, como parte de un mecanismo inhibitorio orientado a proteger las estructuras contráctiles frente a altos niveles de tensión con este tipo de acción muscular (Hortobágyi, 1996; Aagard et al., 2000).

También se ha sugerido que la menor activación electromiografía refleja la intervención de los componentes elásticos de las fibras musculares, principalmente los filamentos de (Lindstedt et al., 2001; Roig et al., 2008) Sin embargo, autores como (Komi et al., 2000; Aagaard et al., 2000), citado por (Guilhem et al., 2010) concluyen que durante contracciones excéntricas a baja intensidad de los flexores del codo no se recluten en primer lugar las UMs de fibras rápidas. Lo mismo ocurre con Aagaard et al. (2000), en cuyo estudio se utilizaron contracciones excéntricas máximas de los extensores de la rodilla.

##### 5). El daño muscular, (Delayed Onset Muscle Soreness) (DOMS).

El efecto de la contracción excéntrica sobre el daño muscular es ampliamente estudiado. Generalmente, el daño muscular se produce como consecuencia de la realización de ejercicio excéntrico poco familiar, lo que requiere una mayor aplicación de fuerza por UM activa (Guilhem et al., 2010; Guilhem et al., 2012). Por tanto, una mayor tensión es aplicada en un menor número de fibras musculares, causando lesiones mecánicas en las mismas (García-Lopez, 2008). El daño muscular inducido por el ejercicio conlleva un incremento de las enzimas circulantes intramusculares (como la creatinquinasa o la mioglobina), y supone un perjuicio en la capacidad neuromuscular (reducción del 10-60% de la fuerza generada durante una máxima contracción voluntaria) (Guilhem et al., 2010). Esto también supone unas consecuencias a nivel metabólico, disminuyendo el aporte de glucosa y la sensibilidad a la insulina, repercutiendo en la síntesis de glucógeno y elevando el ratio metabólico y el metabolismo no oxidativo (Chen et al., 2022; González et al., 2015). Esto desencadena en una serie de síntomas que aparecen a partir de las 12 horas posteriores al ejercicio, acentuándose a las 24-48 horas y desapareciendo a los 5-7 días (Isner-Horobeti et al., 2013), entre los que destacan dolor y rigidez muscular, pérdida de la capacidad contráctil, reducción de la amplitud del rango de movimiento, hinchazón y déficit propioceptivo (García-Lopez, 2008). Todo ello puede verse acentuado cuando se emplean altas velocidades de contracción (Chapman et al., 2006), altas intensidades (McHugh y Tetro, 2003), ejercicios o ángulos de trabajo que implican un mayor

estiramiento de las fibras musculares (Proske y Allen, 2005), y sujetos poco experimentados en el entrenamiento de fuerza (Newton et al., 2008).

#### 6). El efecto protector (“repeated bout effect”)

Es un fenómeno protector en el músculo, denominado como efecto de esfuerzo repetido. Consiste en que, después de un ejercicio excéntrico que genera daño muscular, el entrenamiento excéntrico sistematizado ha demostrado reducir el daño muscular inducido por el ejercicio de manera significativa (Fernandez-Gonzalo, 2011; Garcia-Lopez, 2006) en las sesiones posteriores de los mismos ejercicios acelerando la recuperación de la fuerza muscular (McHugh y Tetro, 2003). Esto es considerado como una adaptación frente a nuevas cargas de similares características. McHugh y Tetro, (2003) mencionan tres posibles teorías que intentan explicar tal fenómeno, la primera es la Teoría de la Adaptación Neural, que sugiere que se incorporan fibras adicionales durante la contracción muscular, observándose un mayor reclutamiento de unidades motoras en el siguiente estímulo. De modo que la distribución de carga entre las fibras es mejor. La segunda es la Teoría de la Adaptación Mecánica, que sugiere que el aumento en la rigidez miotendinosa dinámica y pasiva (stiffness) como respuesta a una alta carga excéntrica deriva en adaptaciones a nivel del citoesqueleto que podrían acentuar los mecanismos de protección de la propia fibra muscular. Por último, se menciona la Teoría de la Adaptación Celular, que plantea como respuesta al daño muscular la adición de sarcómeros en serie y adaptaciones a las propias respuestas inflamatorias.

### 3.2. LIMITACIONES DEL EJERCICIO EXCÉNTRICO

El entrenamiento tradicional de fuerza consiste en el levantamiento (requiriendo una acción concéntrica) y en el descenso (requiriendo una acción excéntrica o decelerativa) de la carga o peso. Sin embargo, el músculo esquelético no es capaz de acelerar cargas en la fase concéntrica con las mismas garantías que puede

hacerlo decelerándolas. Esto es debido a, como se mencionaba anteriormente, las características únicas de la contracción excéntrica, es decir al conocido perfil de fuerza-velocidad. Por lo tanto, las cargas movilizadas durante el entrenamiento de fuerza se encuentran limitadas por la capacidad de aplicación de fuerzas que el sujeto posee durante la fase concéntrica, aportando un estímulo submáximo a la fase excéntrica, ya que la fisiología muscular permite aplicar una mayor cantidad de fuerza durante la fase de elongación muscular que durante el acortamiento. Esto ha llevado a que numerosos investigadores y entrenadores prescriban ejercicio excéntrico aislado en sus programas de entrenamiento de fuerza. Sin embargo, el ejercicio aislado excéntricamente presenta una serie de limitaciones que hacen que no sea ampliamente utilizado (Hortobagyi et al., 2001). Entre estas limitaciones destaca la dificultad para cuantificar la carga de entrenamiento, los problemas para aislar el movimiento de la fase concéntrica, los grandes requisitos de experiencia en el entrenamiento de fuerza y altos niveles de ejecución técnica requeridos, la utilización de material económicamente costoso (por ejemplo, los dinamómetros isocinéticos), y por último, la eliminación del ciclo estiramiento-acortamiento, lo que implica que este método de trabajo tenga poca aplicabilidad, funcionalidad y una baja transferencia al rendimiento deportivo y a las actividades de la vida cotidiana.

## 4. ENTRENAMIENTO DE FUERZA ACENTUADO EXCÉNTRICAMENTE

El entrenamiento de fuerza con sobrecarga excéntrica (o acentuado excéntricamente) ha emergido como un método alternativo para prescribir entrenamiento de fuerza de forma óptima, al considerar la capacidad de producción de fuerza de la acción muscular excéntrica y evitar la eliminación del ciclo de estiramiento-acortamiento que acontecía con el entrenamiento aislado excéntricamente (Wagle et al., 2017). Este método consiste, por tanto, en la prescripción de una carga excéntrica acentuada o incrementada respecto a la carga concéntrica (Schoenfeld y Grgic, 2018). Esto requiere la realización de ambas fases del movimiento y mantiene las características mecánicas naturales del movimiento humano. Varios estudios previos han documentado evidencia científica de que la producción de fuerza y potencia se ve aumentada (Aboodarda et al., 2013; Ojasto y Hakkinen, 2009; Sheppard y Young, 2010), y de este modo, las adaptaciones obtenidas por el entrenamiento se ven acentuadas (Wagle et al., 2017). Hoy por hoy sabemos que aplicar un estímulo sobrecargado excéntricamente (en el que se incluyen ambas acciones musculares, pero la acción excéntrica con una carga absoluta mayor que la concéntrica) implica numerosos beneficios, entre los que destacan una mayor velocidad de conducción neural, un aumento en el rendimiento del ciclo de estiramiento-acortamiento, un mayor ratio de desarrollo de la fuerza y una mayor ganancia de fuerza máxima, un aumento en el reclutamiento de fibras de tipo IIa y IIx, un mayor aumento del tamaño muscular, de los sarcómeros en serie y de la longitud del fascículo, además de un fenotipo muscular más rápido (Maroto-Izquierdo, 2019). Para ello, se han empleado dispositivos que permiten aportar una resistencia adicional durante la acción decelerativa, como es el caso de los liberadores de carga (Walker et al., 2016), y también dispositivos con un mayor componente tecnológico, como los motores eléctricos que asisten el movimiento (Friedmann et al., 2004; Friedmann et al., 2010; Yarrow et al., 2008). Tradicionalmente, el entrenamiento con sobrecarga excéntrica ha sido realizado con estos medios

tradicionales, suponiendo, a pesar de la falta de consenso existente sobre el empleo de carga excéntricas submáximas, máximas o supramáximas, importantes adaptaciones crónicas, en algunos casos superiores a las inducidas por el entrenamiento tradicional (Wagle et al., 2017):

a) Incrementos en la fuerza máxima dinámica entre el 5 y el 20% han sido documentados tras programas de entrenamiento con cargas submáximas (Friedmann et al., 2004) y supramáximas (Yarrow et al., 2008). Estos resultados sugieren que el empleo de grandes porcentajes de sobrecarga (es decir, cargas concéntricas bajas y excéntricas altas) durante el entrenamiento con sobrecarga excéntrica puede ser más efectivo que el entrenamiento con cargas concéntricas altas. Por lo que un potencial uso de este método puede ser mantener la capacidad de fuerza máxima mientras se enfatiza en la alta velocidad de movimiento concéntrico o se reduce la carga total de trabajo en función de la planificación y periodización del entrenamiento (Hakkinen et al., 1985b; Ojasto y Hakkinen, 2009; Wagle et al., 2017).

b) Aumentos de la fuerza máxima isométrica del 18 al 23% también han sido observados empleando cargas tanto submáximas como supramáximas (Hortobagyi et al., 2001; Walker et al., 2016), e induciendo cambios mayores que el entrenamiento tradicional. Esto puede deberse a una mayor sensibilidad al calcio y a un aumento de la conducción neural inducido por la sobrecarga de trabajo (Wagle et al., 2017).

c) Mejora de aproximadamente un 28% en la resistencia muscular después del entrenamiento con cargas excéntricas supramáximas (Walker et al., 2016). Esta eficiencia mecánica, la cual parece ser independiente de la condición de la carga excéntrica, se atribuye a los cambios neurales que conlleva la acentuación de la acción excéntrica (Coratella y Schena, 2016; Vogt y Hoppeler, 2014).

d) Estos cambios neurales, son transferibles favorablemente a las actividades que implican al ciclo de estiramiento-acortamiento, el cual tiene un efecto directo en el rendimiento deportivo. Así, se ha observado una mayor producción de potencia muscular en una acción concéntrica cuando esta se encontraba precedida de una

acción excéntrica acentuada (Sheppard et al., 2007). Esta mayor producción de potencia observada en una acción concéntrica subsecuente puede ser la justificación de las adaptaciones relativas encontradas al rendimiento explosivo tras el entrenamiento aislado o reforzado excéntricamente. Sin embargo, esto no ha sido observado cuando se emplean amplios tiempos de vuelo en movimientos que implican una fase aérea, debido a la larga transición entre fase excéntrica y concéntrica y a la gran cantidad de energía disipada durante el aterrizaje del salto (Moore et al., 2007; Cormie et al., 2008). Por lo tanto, acciones excéntricas que se dan en periodos cortos de tiempo y a altas velocidades excéntricas son favorables, favoreciendo cambios positivos en el rendimiento pliométrico. (Fernandez-Gonzalo et al., 2014a; Maroto-Izquierdo et al., 2019; Douglas et al., 2018).

e) Todos estos efectos positivos que tienen lugar en variables funcionales están relacionadas con cambios estructurales. Además, el efecto potencial del entrenamiento excéntrico aislado sobre la hipertrofia eleva la posibilidad de que el entrenamiento con sobrecarga excéntrica aumente la cantidad de masa muscular (English et al., 2014; Schoenfeld y Grgic, 2018). No obstante, varios estudios han encontrado diferencias en la fuerza (Brandenburg y Docherty, 2002; Walker et al., 2016), y en el salto vertical pero no en la cantidad de masa muscular después de aplicar un entrenamiento acentuado excéntricamente en comparación con un protocolo de entrenamiento tradicional (Friedmann et al., 2010). Aunque esto puede deberse a una falta de consideración de la región específica del músculo en la que se mide el área de sección transversal (Franchi et al., 2017). Puesto que el entrenamiento reforzado excéntricamente, al igual que sucede con el entrenamiento excéntrico aislado, induce cambios en la arquitectura muscular que también son favorables en la producción de fuerza y potencia (Franchi et al., 2017). Además, el entrenamiento con sobrecarga excéntrica ha demostrado incrementar el área de sección transversal específico de las fibras tipo II y tipo I, y favorecer la transferencia de fibras tipo IIa a IIx (Friedmann et al., 2010). Varios dispositivos no dependientes de la gravedad han emergido más recientemente, para facilitar la realización de ejercicio reforzado excéntricamente (Tinwala et al., 2017). Entre ellos destacan los motores eléctricos,

que generan resistencia por si solos en ambas fases del movimiento (no limitándose a movilizar la carga durante la fase concéntrica); y, los dispositivos de rueda inercial, que requieren de una acción concéntrica máxima para acumular energía cinética rotacional, la cual ha de ser disipada durante un momento concreto de la fase excéntrica, para obtener una sobrecarga de trabajo (Carroll et al., 2018). Los dispositivos de motor eléctrico y los de rueda inercial destacan entre los métodos existentes por otorgar al entrenamiento con sobrecarga excéntrica una fácil y rápida aplicación al mismo tiempo que mantienen los beneficios anteriormente señalados, y así no requerir de la asistencia de terceros o de pesados materiales que añadir al ejercicio durante la acción de (Fernandez-Gonzalo et al., 2014a; Norrbrand et al., 2008; Seynnes et al., 2007; Tesch et al., 2004a). Por ello, su uso se ha extendido durante los últimos años. Como consecuencia, el interés de investigadores, entrenadores y practicantes ha crecido enormemente, por lo que una línea de investigación que analice sus efectos y lo compare con otros medios de entrenamiento es necesaria.

## 5. ENTRENAMIENTO DE FUERZA UNILATERAL: UN NUEVO PARADIGMA EN LA PRESCRIPCIÓN DEL EJERCICIO DE FUERZA EN CONTEXTOS CLÍNICOS Y DEPORTIVOS

Durante las contracciones musculares máximas voluntarias bilaterales MVC, se producen una cantidad de fuerza menor que la suma de las fuerzas producidas en acciones unilaterales, así podemos decir que la activación voluntaria en la tarea bilateral es deficiente, fenómeno también conocido como “déficit bilateral” (Vieluf et al., 2013). En general, el déficit bilateral es la diferencia de fuerza entre el miembro dominante y el no dominante del cuerpo, que se denomina también como “asimetría bilateral” (Krzykala, 2010). La mayoría de las investigaciones indican que la asimetría está más pronunciada en los miembros superiores que en los inferiores (Krzykala, 2012). En cuanto a la asimetría de la masa muscular (es decir, en cuanto al área de sección transversal del músculo), diversos autores indican que es inferior al 1% (Masuda et al., 2003; Demura et al., 2001; McCurdy y Langford, 2005). Por otro lado, en cuanto al miembro inferior, otros autores (Wiest et al., 2010) reportan que la pierna dominante era un 4-5% más fuerte que la no dominante (Lanshammar y Ribom, 2011). En cuanto a la potencia mecánica máxima, la pierna dominante era un 12% mayor que la no dominante (Almeida et al., 2012). Sin embargo, los mecanismos subyacentes al déficit bilateral no han sido completamente descritos. Se hipotetiza que este fenómeno acontece por una limitación del sistema nervioso central para activar la musculatura homóloga en diferentes partes del cuerpo y generar una cantidad similar de fuerza y velocidad entre miembros (Taniguchi et al., 2001). También se ha descrito que este rendimiento limitado de los músculos homólogos puede ser debido a alteraciones en la región supraespinal (Carroll et al., 2018). La relación entre la fuerza máxima bilateral y la suma las fuerzas de cada miembro puede ser de hasta un 75%, pero, por lo general, se sitúa en el 90%. Sin embargo, estas diferencias son relativas, ya que también pueden deberse a la falta de sincronía entre las mediciones de la fuerza y EMG para poder cuantificar el tamaño

del déficit, además otros factores neurales pueden estar también implicados en este fenómeno, en concreto las conexiones inter-hemisféricas directas y por vías subcorticales que pueden contribuir a mediar una interacción inhibitoria entre músculos homólogos. El entrenamiento inespecífico (es decir, el entrenamiento de fuerza), la familiarización y el entrenamiento específico de tareas reales pueden reducir este déficit bilateral. El desarrollo de la fuerza está destinado al desarrollo de músculos menos utilizados en el deporte y de la musculatura del miembro inferior no dominante (músculos sinergistas y antagonistas) para promover el desarrollo equilibrado y compensado de la fuerza y de sus diferentes manifestaciones con una aplicación directa en las habilidades y las acciones técnicas específicas de cada persona.

Al emplear métodos de entrenamiento, se puede optar por intervenciones de entrenamiento unilateral o bilateral. El entrenamiento unilateral, a diferencia del bilateral, consiste principalmente en la realización de ejercicios únicamente por la acción de un único miembro, y donde, por tanto, los miembros se entrenan por separado (Ehlers Botton y Silveira Pinto, 2012). En el ámbito de la rehabilitación también se utiliza para mejorar el miembro contralateral aprovechando los cambios inducidos por el efecto cruzado (Lee et al., 2009). Algunos ejercicios unilaterales habitualmente empleados en el entrenamiento unilateral del hemicuerpo inferior son, la subida de escalones y la sentadilla con una sola pierna, que a veces recibe el nombre de sentadilla elongada o búlgara. Este ejercicio aísla una pierna y se suele usar en la preparación de atletas para muchos deportes. Estos ejercicios se incluyen en el entrenamiento con diversos grados de énfasis (McCurdy et al., 2005), en un intento de reducir las asimetrías bilaterales (Kobayashi et al., 2010), cuando existen asimetrías en la producción de fuerza entre movimientos unilaterales y bilaterales (Jakobi et al., 2001) o como un medio de rehabilitación (Escamilla et al., 2009). Se ha demostrado que los movimientos bilaterales exhiben una facilitación bilateral cuando hay un incremento de la activación voluntaria de los músculos agonistas (Behm et al., 2002; Santana et al., 2007). Las personas entrenadas o más fuertes tienden a exhibir una facilitación bilateral, por lo contrario las personas no entrenadas, lesionadas o más

débiles muestran un déficit bilateral (Behm, et al., 2010). Por tanto, basándonos en la respuesta de facilitación bilateral, las personas entrenadas no deben usar métodos unilaterales para el desarrollo de la fuerza. Por el contrario, estos métodos tal vez sean útiles para el desarrollo de la fuerza de personas no entrenadas, débiles y lesionadas (Behm, et al., 2010).

### **5.1. EL EFECTO CRUZADO**

El entrenamiento con ejercicios unilaterales afecta no solo a los músculos de una extremidad entrenada, sino también a los músculos de la extremidad contralateral no entrenada, lo que se conoce como educación cruzada o efecto de transferencia cruzada (Hendy y Lamon, 2017; Manca et al., 2017; Manca et al., 2028; Manca et al., 2021; Green et al., 2018). El entrenamiento cruzado se refiere al efecto contralateral como consecuencia de la actividad motriz crónica por un tiempo determinado, donde el miembro homólogo no entrenado incrementa su fuerza. En la literatura científica le se han referido como ejercicio cruzado, efecto cruzado, educación cruzada, transferencia cruzada, o efecto de entrenamiento de fuerza contralateral, y puede ocurrir tanto en los músculos de las extremidades superiores como las extremidades inferiores del cuerpo (Sariyildiz et al., 2011; Munn et al., 2004; Carroll et al., 2006; Zhou, 2003). Scripture et al., 1894, se refería a este fenómeno como (práctica indirecta), y desde entonces existen en la literatura muchos estudios que han demostrado la existencia del efecto cruzado en distintos contextos. Este fenómeno no está limitado a grupos musculares específicos, ni es dependiente de edad o género, y generalmente se puede observar tras un programa de entrenamiento de fuerza unilateral, tras un programa de estimulación eléctrica del músculo, e incluso por la práctica mental de ejercicios de fuerza (Hendy y Lamon, 2017). La magnitud del efecto cruzado sobre la fuerza está directamente relacionada con las ganancias de fuerza del músculo en el miembro ipsilateral entrenado (Munn et al., 2005). El efecto cruzado es, por tanto, un fenómeno real, cuantificable y

ampliamente estudiado. Diversos autores han comprobado la existencia del efecto cruzado con diferentes experimentos donde, los efectos de la educación cruzada se han observado en los miembros superiores/ inferiores, en la extremidad dominante /no dominante y bajo diferentes acciones (isométricas, dinámicas e Isocinéticas), y en diferentes grupos musculares (grandes y pequeños), con diferentes tipos de entrenamiento (estáticos y dinámicos), en diferentes tareas simples y compleja), (Lee et al., 2007).

En particular, el entrenamiento con ejercicios de resistencia unilateral mejora la fuerza, Tanto en el miembro ipsilateral entrenado como en los músculos homólogos del miembro contralateral no entrenado (Adamson et al., 2008; Manca et al., 2017; Manca et al., 2028; Carroll et al., 2006). La magnitud del efecto de la educación cruzada sobre la fuerza muscular es ~20%, con un efecto mayor en el miembro inferior (27%) que los músculos de las extremidades superiores (13 %) (Hendy y Lamon, 2017; Manca et al., 2017; Manca et al., 2018). De hecho, este hallazgo ya fue demostrado en estudios clásicos con intervenciones de entrenamiento de fuerza unilateral en el tren inferior de menos de 8 semanas quienes reportaron incrementos de la fuerza de un 19% en miembro entrenado y un 11% en el miembro no entrenado (Kannus et al., 1992), Sin embargo, aún se encuentran resultados muy dispares en la literatura reciente. Esto es debido a las principales limitaciones de esta metodología. Uno de los principales problemas en los estudios relacionados con los efectos contralaterales del entrenamiento unilateral es la familiarización de los sujetos (Munn et al., 2004), otros factores que se deben tomar en cuenta son las características de cada estudio, de qué forma fue entrenado el miembro dominante, el tipo de acción muscular, si el estímulo fue evocado eléctricamente o mediante contracciones voluntarias, (Hortobagyi et al., 1997; Hortobágyi et al., 1999; Fimland et al., 2009; Sariyildiz et al., 2011; Zhou et al., 2002; Bemben y Murphy, 2001) etc.

La evidencia reporta que la transferencia de habilidades en el entrenamiento unilateral es asimétrica, es decir que las transferencias son mayores desde la dirección del miembro dominante hacia el miembro no dominante (Farthing, 2009).

Por otro lado, varios estudios han demostrado que el entrenamiento de fuerza que usa acciones musculares excéntricas (es decir, de alargamiento muscular) aumentan la fuerza en la extremidad contralateral no entrenada (Manca et al., 2017; Manca et al., 2028), incluso cuando la velocidad del movimiento (Coratella et al., 2015; Lepley y Palmieri-Smith, 2014), o el modo de contracción difieren entre la prueba y los regímenes de entrenamiento (Weir et al., 1995). Por ejemplo, Hortobagyi et al., (1997) demostraron que 12 semanas de entrenamiento isocinético solo excéntrico o solo concéntrico produjeron aumentos significativos en la fuerza de una MVIC de los músculos de las extremidades contralaterales no entrenados (39% y 22%, respectivamente), indicando potencialmente que el entrenamiento de fuerza prescrito con acciones musculares excéntricas produce un mayor efecto de educación cruzada en el músculo homólogo no entrenado que el ejercicio concéntrico (Lepley y Palmieri-Smith, 2014; Tseng et al., 2020). En la revisión de Green y Gabriel (2018) informaron que la magnitud del aumento de la fuerza muscular en la extremidad contralateral no entrenada osciló entre el 52 y el 80% de la de la extremidad entrenada. Hasta donde sabemos, al menos diez estudios han demostrado que el entrenamiento de fuerza excéntrico, ya sea de carácter isocinético (Coratella et al., 2015; Lepley y Palmieri-Smith, 2014; Hortobagyi et al., 1997; Tseng et al., 2020; Hortobagyi et al., 1999; Farthing y Chilibeck, 2003; Kidgell et al., 2015) o, isotónico (Weir et al., 1995; Valdés y al., 2021) o reforzado excéntricamente (Maroto-Izquierdo et al., 2021), genera un efecto de educación cruzada sobre la fuerza del miembro contralateral no entrenado. (Manca et al., 2017); Manca et al., 2018), demostraron que las ganancias de fuerza contralateral isométrica, concéntrica y excéntrica fueron, en promedio, mayores después de un régimen excéntrico aislado con dispositivos isocinéticos (20-77%) que con un régimen isotónico concéntrico/excéntrico (20-77%). En el meta-análisis de Roig et al., (2009), se reporta que con el ejercicio excéntrico a altas intensidades un aumento significativo en la fuerza total y la fuerza excéntrica en comparación con el entrenamiento concéntrico, además las ganancias de fuerza después del entrenamiento excéntrico son más específicas en términos de velocidad y el modo de contracción, en comparación con

el entrenamiento concéntrico (Seger y Thorstensson, 2005). Recientemente, Maroto-Izquierdo et al., (2021) también ha demostrado la superioridad del entrenamiento acentuado excéntricamente, proponiéndolo como la estrategia ideal para acentuar el efecto cruzado cuando el estímulo de ejercicio está constituido por acciones concéntricas máximas, con sobrecarga excéntrica producida a alta velocidad. Siendo el primer estudio en el que no solo se han observado cambios en la fuerza si no también en otros parámetros neuromusculares y funcionales como la potencia mecánica y el salto vertical (Maroto-Izquierdo et al., 2021). Por lo que las mayores demandas neuromusculares del entrenamiento con sobrecarga excéntrica podrían explicar una magnitud mayor en el efecto cruzado.

## **5.2. POSIBLES MECANISMOS FISIOLÓGICOS INVOLUCRADOS EN EL EFECTO CRUZADO**

A pesar de la abundancia de evidencia científica que documenta la existencia del efecto cruzado, los mecanismos subyacentes responsables de la transferencia cruzada no son totalmente conocidos (Hendy et al., 2012). El entrenamiento con resistencia se sabe que aumenta la fuerza a través de adaptaciones, tanto en el sistema muscular como en el sistema nervioso (Behm y Sale, 1993; Folland y Williams, 2007). Si bien la fisiología de las adaptaciones musculares después de entrenamiento de resistencia se entiende bien, pero la naturaleza de las adaptaciones neuronales es menos clara. Una forma indirecta para indicar la existencia de adaptaciones neurales por el entrenamiento con resistencia viene dada por la existencia del efecto cruzado, que describe el aumento de la fuerza en la dirección opuesta, de una extremidad sin entrenamiento tras el entrenamiento de fuerza unilateral (Lee y Carroll, 2007). La hipertrofia muscular puede llegar a ser mensurable después de varias semanas de entrenamiento (Staron et al., 1994), aunque se ha informado de que la concentración de (mRNA) para proteínas contráctiles puede estar incrementada hasta incluso después de una única sesión de entrenamiento (Willoughby y Nelson, 2002; Lee y

Carroll , 2007) presentan dos hipótesis de los posibles mecanismos. La primera de ellas son los cambios específicos de la tarea en la organización de las vías motoras proyectados al músculo contralateral homólogo, causados por el entrenamiento con resistencias activando así de manera más específica, las vías motoras en el miembro contralateral no entrenado, con posible conducción neural más eficiente hacia los músculos no entrenados, con la consecuencia de un incremento de la fuerza en los músculos homólogos no entrenados. La segunda hipótesis plantea que un entrenamiento con resistencia conduce a adaptaciones en las áreas motoras responsable del control y ejecución de movimientos del miembro entrenado, y el hemisferio opuesto puede acceder a estos circuitos modificados durante las contracciones voluntarias del miembro opuesto no entrenado para la producción de fuerza. Los mecanismos neuronales son probablemente responsables de las ganancias de fuerza contralateral después del el entrenamiento de fuerza unilateral el efecto cruzado se produce con la activación muscular insignificante en la extremidad contralateral no entrenado (Evetovich et al., 2001 Hortobagyi et al., 1997), y está acompañado por la hipertrofia muscular (Farthing y Chilibeck. 2003; Farthing et al., 2005). Aunque no hay consenso sobre el mecanismo que produce las adaptaciones de la fuerza contralateral, se ha sugerido que la magnitud de la fuerza adquirida en el lado contralateral se relaciona con el aumento de la fuerza en el lado entrenado (Zhou, 2000)) No obstante (Shima et al., 2002), encontraron una evidencia directa de que los mecanismos del efecto cruzado se encuentran al menos en parte en el sistema nervioso central a través de la técnica de interpolación (Twitch) asociada a la estimulación nerviosa, donde encontraron un pequeño pero significativo incremento tanto en la activación voluntaria de los flexores plantares entrenados (4.6%) y no entrenados (3.6%) después de seis semanas de entrenamiento de fuerza unilateral. Se cree también que la velocidad (Farthing y Chilibeck, 2003; Paddon-Jones et al., 2001), y el volumen de entrenamiento (Schlumberger et al., 2001), influyen directamente en las adaptaciones de la fuerza en la pierna entrenada, así es posible que estos parámetros pudieran afectar también a las adaptaciones en el efecto cruzado. Sin embargo, (Carroll et al., 2006), en una meta-análisis con 16

estudios controlados (entre 15 a 48 sesiones de entrenamiento), muestra que el tamaño del efecto del entrenamiento de fuerza contralateral es alrededor de un 8% de la resistencia inicial, o aproximadamente la mitad del aumento de la fuerza del lado entrenado. Esta estimación es similar a los resultados de un gran estudio controlado, aleatorizado de entrenamiento de los flexores del codo (efecto contralateral de la fuerza inicial de un 7% o una cuarta parte de los efectos en el lado entrenado). Esto es probable que refleje un aumento de reclutamiento de moto-neuronas en lugar de adaptaciones musculares, aunque la mayoría de los métodos no son lo suficientemente sensibles para detectar pequeñas contribuciones musculares, aunque el tamaño del efecto es pequeño y puede no ser clínicamente significativo, el estudio del fenómeno proporciona información sobre los mecanismos neuronales asociados con el ejercicio y el entrenamiento.

Aunque no se conocen los mecanismos fisiológicos precisos que subyacen a la transferencia contralateral de la fuerza muscular después del entrenamiento, nos limitamos en disponer los mecanismos potenciales plausibles de adaptación según la opinión de (Lee y Carroll, 2007) para identificar cuál de estos factores es más probable que contribuya al efecto del entrenamiento de fuerza contralateral.

### **5.2.1. Mecanismos musculares**

Las adaptaciones dentro de los músculos involucrados en el entrenamiento de fuerza contribuyen a aumentar la capacidad de generación de fuerza (Abernethy et al., 1994; Booth y Haddad, 1998). Estos cambios incluyen hipertrofia, cambios en las concentraciones de enzimas musculares y modificaciones en la composición de proteínas contráctiles (p. ej., proporciones de tipo de fibra). Los estudios en los que se realizaron mediciones antropométricas (Mochizuki et al., 2004), de imagen (Ploutz et al., 1994; Kraemer y Ratamess, 2005), o histológicas (Hortobagyi et al., 1999; Kraemer y Ratamess, 2005) del tipo de fibra y/o del área transversal del músculo no mostraron evidencia de que el entrenamiento de fuerza unilateral provoque

adaptaciones musculares contralaterales. Sin embargo, la posibilidad de que los efectos musculares estén involucrados en el efecto del entrenamiento de fuerza contralateral no debe descartarse solo con esta evidencia, porque es probable que estos métodos carezcan de sensibilidad para detectar adaptaciones de músculos pequeños. La cuestión de si las adaptaciones musculares están involucradas en el efecto del entrenamiento de fuerza contralateral también puede abordarse considerando los procesos que podrían impulsar las adaptaciones musculares en la extremidad no entrenada. Los más obvios son los cambios hormonales anabólicos que acompañan al entrenamiento de resistencia, porque los mediadores sistémicos de este tipo tienen fácil acceso a los músculos de la extremidad no entrenada. Sin embargo, si las adaptaciones impulsadas por hormonas fueran un contribuyente importante al efecto del entrenamiento de fuerza contralateral, sería difícil explicar la observación de que el efecto es específico de los músculos homólogos contralaterales. De hecho, existe evidencia de que la fuerza de los músculos no homólogos no se ve afectada por el entrenamiento de fuerza (Hortobagyi et al., 1999) Sin embargo, aunque las comparaciones entre el efecto del entrenamiento de fuerza contralateral en músculos homólogos versus no homólogos son importantes, probablemente no haya datos suficientes para establecer este punto con certeza. Queda por establecer si el efecto contralateral tiene mayor especificidad articular. También podría esperarse que el efecto del entrenamiento de fuerza contralateral sea mayor cuando se entrenan grupos musculares más grandes (porque estos generan mayores cambios hormonales (Kraemer y Ratamess, 2005) mientras que los efectos del entrenamiento de fuerza contralateral de magnitud comparable pueden inducirse en músculos pequeños de la mano (Yue y Cole, 1992) El pensamiento convencional sugiere que el entrenamiento unilateral probablemente produce muy poca activación de la unidad motora en la extremidad no entrenada para impulsar la adaptación muscular. En algunos estudios se informó un pequeño grado de actividad muscular en la extremidad no entrenada durante el entrenamiento de fuerza unilateral (Farthing et al., 2005; Zijdwind y Kernell, 2001). Sin embargo, el efecto del entrenamiento de fuerza contralateral también ocurre en ausencia de una actividad

contralateral significativa (Evetovich et al., 2001; Hortobagyi et al., 1999). Es difícil concebir cómo podrían inducirse adaptaciones musculares significativas sin una actividad apreciable de la unidad motora. En resumen, un análisis crítico de la evidencia sugiere que es poco probable que las adaptaciones de los músculos periféricos contribuyan sustancialmente al efecto del entrenamiento de fuerza contralateral, pero no se puede descartar la posibilidad de una pequeña contribución.

### **5.2.2. Mecanismos neurales.**

Si el efecto del entrenamiento de fuerza contralateral no se debe a mecanismos musculares, el efecto debe estar mediado por un cambio en la forma en que el sistema nervioso central activa los músculos. Es decir, el impulso neural podría incrementarse a los músculos agonistas y sinergistas o reducirse a los músculos antagonistas. Es importante reconocer que gran parte de la evidencia de los mecanismos neurales de los efectos del entrenamiento contralateral se extrajo de estudios de electromiogramas de superficie EMG, y esto es cuestionable por razones metodológicas que se han destacado en otros lugares (Farina et al., 2004; Gandevia, 2001). En particular, la idea de que la coactivación antagonista reducida es un mecanismo importante para aumentar la fuerza puede haber surgido de la conducción de volumen no detectada en el EMG de superficie, porque los registros EMG intramusculares confirman una inactividad casi completa en los músculos antagonistas durante la contracción voluntaria máxima de flexión del codo (Gandevia, 2001). También hay evidencia de que el entrenamiento de fuerza puede aumentar las tasas máximas de disparo y aumentar la aparición de dobletes al inicio de la contracción (Van Cutsem et al., 1998), y también puede alterar la sincronización de la unidad motora (Mochizuki et al., 2004; Semmler y Nordstrom, 1998) Si estas adaptaciones ocurrieran en el lado no entrenado, podría haber relaciones bastante complejas entre el EMG de superficie y la fuerza que harían problemática la interpretación del EMG de superficie (Farina et al., 2004). Los mecanismos candidatos para este tipo de adaptación incluyen cambios en el patrón de actividad neuronal asociado con el impulso motor y modificaciones adaptativas en los circuitos

neuronales involucrados en la planificación y ejecución motora. También es de esperar que los mecanismos neurales para el efecto del entrenamiento de fuerza contralateral sean paralelos, hasta cierto punto, a las adaptaciones neurales que inducen aumentos de fuerza en la extremidad entrenada después del entrenamiento, Sin embargo, debido a que se desconoce la naturaleza precisa de las adaptaciones neurales en el miembro entrenado, la consideración de los mecanismos que subyacen al efecto del entrenamiento de fuerza contralateral se restringe a la identificación de sitios de interacción neural entre miembros que podrían contribuir a la producción de fuerza en el miembro del lado opuesto del cuerpo.

#### **5.2.2.1. Mecanismos de la médula espinal**

Existe una red compleja de circuitos en la médula espinal que influye en la salida motora, tanto a través de acciones reflejas en las motoneuronas como mediante la modulación de órdenes descendentes (Pierrot-Deseilligny y Durke, 2005). Este circuito da forma al impulso motor en agonistas, sinergistas y antagonistas y, por lo tanto, influye en la capacidad de generación de fuerza. Se han identificado las acciones fundamentales, (es decir, las fuentes neuronales y los efectos inhibidores/excitadores) de muchos circuitos, sin embargo, aún se desconoce mucho sobre la regulación dependiente de la tarea de estas acciones y sobre el papel de los circuitos polisinápticos más complejos. Existe alguna evidencia de que el circuito espinal es modificado por entrenamiento de fuerza, aunque la mayoría de las técnicas que se han utilizados para estudiar este fenómeno no permiten identificar sitios específicos de adaptación (Aagaard et al., 2002; Carroll y Carson, 2002, Lagerquist et al., 2006). Lagerquist et al., (2006) ha investigado si el entrenamiento unilateral provoca cambios en la hemicordón no entrenada, y no encontraron cambios en la amplitud del reflejo H en la opuesta extremidad no entrenada después de un programa de entrenamiento isométrico que aumentó la amplitud del reflejo H en la extremidad entrenada. Mientras esto sugiere que las adaptaciones en el circuito del

reflejo de estiramiento autógeno no son un contribuyente importante al entrenamiento de fuerza contralateral, efecto no excluye la participación de otros circuitos espinales. La adaptación de otros circuitos espinales es plausible, porque la contracción o el movimiento unilateral dan como resultado la modulación de ganancia de los circuitos espinales contralaterales. Hortobagyi et al., (2003), demostraron que la fuerte flexión unilateral de la muñeca deprimía la ganancia del reflejo H en los flexores de la muñeca contralaterales, la mayoría probablemente a través de una forma atípica y prolongada de inhibición presináptica de la sinapsis aferente-motoneurona contralateral. Los movimientos rítmicos también deprimen la ganancia del reflejo H tanto en los miembros superiores e inferiores (Carson et al., 2004), y el hecho de que la modulación ocurre durante el movimiento activo y pasivo sugiere que las entradas aferentes juegan un papel. Aunque hay extensas extremidades cruzadas e interacciones espinales durante la contracción unilateral, son necesarios experimentos que comparen directamente los cambios en el umbral y la ganancia de los circuitos específicos tanto en la extremidad entrenada como en la no entrenada, para determinar cuáles de estos son mecanismos probables para educación cruzada.

#### **5.2.2.2. Mecanismos corticales.**

Una extensa red de circuitos distribuidos (principalmente) a lo largo de los lóbulos frontales del cerebro la corteza está involucrada en la planificación y ejecución de acciones voluntarias movimiento. Estas áreas motoras están organizadas en una manera vagamente jerárquica: desde la toma de decisiones de orden superior y la planificación en las regiones prefrontales al relativamente directo control de la salida motoneuronal en la corteza motora primaria M1. Aunque existe una fuerte evidencia de que el aprendizaje motor es asociado con la reorganización cortical (Kleim et al., 2004; Muellbacher et al., 2002), no hay evidencia definitiva de que el entrenamiento de fuerza provoca adaptaciones corticales (Carroll y Carson,

2002; Jensen et al., 2005), Sin embargo, existen conexiones interhemisféricas a través del cuerpo calloso entre la mayoría áreas motoras corticales, así como proyecciones corticoespinales bilaterales e ipsilaterales a muchos músculos proximales (Carson, 2004). Por lo tanto, existen numerosos sitios de interacción cortical de las extremidades cruzadas que podrían contribuir al efecto del entrenamiento de fuerza contralateral. De estos sitios, las fibras corticoespinales no cruzadas que se dirigen a las motoneuronas ipsilaterales y ramificadas fibras corticoespinales que se proyectan a las motoneuronas bilateralmente parece menos probable que tenga un papel importante en el efecto contralateral del entrenamiento de fuerza. Esto se debe a que estas proyecciones son más fuerte para los músculos axiales, y puede estar ausente para la extremidad distal músculos, mientras que los efectos del entrenamiento de fuerza contralateral de magnitud similar pueden ser inducidos en todo el cuerpo, incluyendo la mano (Carr et al., 1994; Hortobagyi et al., 2005; Mann et al., 2005) Algunos tipos de interacción interhemisférica proporcionan una base plausible para la primera clase de mecanismo que podría mediar el efecto del entrenamiento de fuerza contralateral. Es decir, fuerte estafa la tracción de una extremidad afecta la ganancia del circuito cortical ipsilateral que, con la ejecución repetida, podría inducir adaptaciones en el sistema de control "no entrenado" para permitir un impulso motor más eficaz cuando la extremidad no entrenada se contrae al máximo. Las contracciones unilaterales de moderadas a fuertes intensidades (es decir, 40% del MVC) facilitan las respuestas a la estimulación magnética transcraneal TMS en la extremidad en reposo (Hortobagyi et al., 2003; Liepert et al., 2001; Muellbacher et al., 2002; Stinear et al., 2001), aunque algunos tipos de contracción unilateral deprimen estas cortezas motoras, potenciales evocados en el miembro opuesto (Liepert et al., 2001). Esto puede deberse en parte a la existencia de conexiones M1-M1 entre hemisféricas cruzadas excitatorias e inhibitorias (Hanajima et al., 2001; Gandevia, 2001; Sohn et al., 2003), y posiblemente a conexiones dorsales de la corteza premotora-M1 (Mochizuki et al., 2004). Otra posibilidad es que la modulación de la excitabilidad de M1 ipsilateral se deba a entradas comunes a ambos M1 desde áreas corticales de orden superior involucradas en la planificación motora.

El entrenamiento unilateral posiblemente podría causar adaptaciones en áreas corticales involucradas en la función motora distintas de M1, porque hay conexiones callosas entre las áreas motoras complementarias bilaterales, las áreas motoras cinguladas y las áreas prefrontales (Iwamura et al., 2001), y los datos de imágenes sugieren que estas áreas son activadas durante la contracción unilateral (Haaland y Harrington, 2000; Kawashima et al., 1993). Sin embargo, a pesar de estas interacciones transhemisféricas, no hay evidencia de que la actividad motora unilateral pueda inducir adaptaciones en la corteza motora ipsilateral. Se necesitan estudios que evalúen directamente si existe una reorganización funcional del hemisferio ipsilateral después del entrenamiento de fuerza unilateral. Para probar esta posibilidad, los métodos de neuro imagen pueden parecer prometedores, pero tienen serias limitaciones, por ejemplo, no suelen distinguir entre una activación excitatoria o inhibitoria, o si algún cambio implica la entrada o salida de la región cortical. Por lo tanto, es difícil separar un epifenómeno de un cambio que en realidad mejora el rendimiento de las motoneuronas en el lado no entrenado. La idea básica detrás de la segunda clase de mecanismo que podría subyacer al efecto del entrenamiento de fuerza contralateral es que el procesamiento en el hemisferio ipsilateral puede ayudar con la ejecución motora unilateral. La evidencia de que esto ocurre proviene de estudios de imágenes (Haaland et al., 2004; Verstynen et al., 2005) estudios de lesiones (Haaland et al., 2000), y estudios de TMS (Strens et al., 2003) El estudio de Strens (2003) proporciona un ejemplo elegante de los principales conceptos asociados con esta clase de mecanismo, aunque el contexto guarda poca semejanza con el entrenamiento de fuerza. Cuando la excitabilidad de ambas cortezas motoras fue deprimida por TMS repetitiva bilateral rTMS, los participantes perdieron la capacidad de igualar con precisión una fuerza objetivo durante el golpeteo con los dedos. Sin embargo, cuando solo se estimuló el hemisferio contralateral a la extremidad en movimiento, la producción de fuerza no se vio afectada. Esto indica que la corteza ipsilateral puede contribuir a la regulación de la fuerza cuando la corteza contralateral no está disponible (Howatson et al., 2011). Existen asimetrías interhemisféricas en la capacidad de la corteza ipsilateral para

contribuir al control motor unilateral. En la mayoría de los sujetos, el hemisferio izquierdo (que se proyecta hacia el miembro dominante de los sujetos diestros) tiene un papel más importante en el control del miembro izquierdo que el hemisferio derecho en el control del miembro derecho (Haaland et al., 2004; Kawashima et al., 1993; Verstynen et al., 2005). El hecho de que el efecto del entrenamiento de fuerza contralateral también sea mayor cuando se entrena la extremidad derecha (Farthing et al., 2005) apoya la segunda clase de mecanismo; sugiere que se puede acceder a los circuitos en el sistema de control para la extremidad derecha entrenada (es decir, el hemisferio izquierdo) para aumentar la fuerza de la extremidad izquierda no entrenada.

#### 5.2.2.3. Mecanismos subcorticales.

A nivel de comparación Se sabe poco sobre el potencial de la interacción neural entre las extremidades en los centros subcorticales involucrados en el control del movimiento, como los núcleos de los ganglios basales, el cerebelo y el tronco encefálico que dan lugar a tractos descendentes no piramidales (p. ej. Tractos reticuloespinales y vestibuloespinales). Sin embargo, las lesiones unilaterales tanto de los ganglios basales como de los circuitos del cerebelo provocan deficiencias motoras en ambos lados del cuerpo (Vergara-Aragón et al., 2003; Immisch et al., 2003). Además, existen conexiones anatómicas interhemisféricas dentro de las asas corticosubcorticales asociadas con ambas estructuras (Farina et al., 2004). También es posible la participación de interneuronas propioespinales en interacciones bilaterales entre hemicordones (Pierrot-Deseilligny y Durke, 2005). Aunque actualmente no hay evidencia de que los circuitos subcorticales típicamente involucrados en la ejecución motora de la extremidad opuesta contribuyan a las contracciones unilaterales de alta fuerza en los humanos, la existencia de sustratos anatómicos para la interacción entre las extremidades sugiere que tal función puede existir. Por lo tanto, no se puede excluir por lo menos en la actualidad, la posibilidad de que las áreas cerebrales subcorticales estén involucradas en el efecto del entrenamiento de fuerza contralateral.

### 5.3. LA IMPORTANCIA DEL EFECTO CRUZADO EN CONTEXTOS CLÍNICOS Y DEPORTIVOS

Existe un evidente potencial del efecto cruzado en el contexto clínico y en el ámbito de la rehabilitación con ejercicios para pacientes con limitaciones en una extremidad, tal como lesiones agudas de las extremidades, la inmovilización del miembro post-intervención quirúrgica y ciertos trastornos neurológicos con debilidad muscular predominantemente unilateral (como por ejemplo la esclerosis múltiple o un accidente cerebrovascular). Investigaciones para obtener una comprensión de las adaptaciones neurales que ocurren durante la inmovilización son esenciales, y además pueden tener aplicación en el entrenamiento unilateral y en la rehabilitación de lesiones músculo esqueléticas (Hendy et al., 2012). Al entrenar la extremidad sana para fortalecer la extremidad lesionada, se puede reflejar potencialmente en menor grado de complicaciones a causa del desuso y una mayor efectividad de la rehabilitación.

A pesar del potencial efecto positivo del efecto cruzado sobre determinadas aplicaciones clínicas, tenemos que ser cautos al hacer recomendaciones con respecto a su papel específico en la rehabilitación basada en el ejercicio, y especialmente con la prescripción de ejercicios unilaterales. El entrenamiento unilateral se caracteriza por aumentar la fuerza a través de adaptaciones, tanto en los sistemas muscular como nervioso. El efecto cruzado, que describe el aumento de la fuerza en la extremidad contralateral del lado entrenado tras el entrenamiento con resistencia unilateral (Carroll et al., 2006; Farthing y Zehr, 2014) puede ser un indicador o una evidencia indirecta de las adaptaciones neurales que acompañan el entrenamiento de fuerza (Farthing y Zehr, 2014), tanto para la restauración de la asimetría como para evitar las pérdidas inducidas por un desuso o inmovilización. Por lo que los mecanismos del efecto cruzado puede que solo tengan un pequeño impacto en la vida cotidiana de personas sin patologías, pero un alto impacto en contextos de

rehabilitación. Entre las principales recomendaciones de este tipo de ejercicio en contextos de salud, podemos establecer que su aplicación mediante entrenamiento de fuerza con alta intensidad en un corto plazo, es decir entre 4-6 semanas es efectivo, al menos con sujetos sanos (Dragert y Zehr, 2011).

En cuanto al tipo de contracción muscular, destaca la superioridad del entrenamiento excéntrico para aumentar la fuerza y otros parámetros neuromusculares, incluso parámetros estructurales (Maroto-Izquierdo et al., 2019; Maroto-Izquierdo et al., 2021) frente al entrenamiento concéntrico, lo que se explica por la mayor demanda neuromuscular subyacente tras el entrenamiento excéntrico en comparación con el ejercicio de fuerza tradicional basado en la fuerza máxima dinámica concéntrica (Hendy y Lamon, 2017; Manca et al., 2017; Manca et al., 2018; Manca et al., 2021; Green y Gabriel, 2018). Por lo que la alta especificidad de las ganancias neurales después del entrenamiento excéntrico puede ser explicada posiblemente por el papel del patrón neuronal especializado de las acciones excéntricas (Farthing et al., 2005).

En cualquier caso, para aclarar los mecanismos que controlen tal especificidad y su significado funcional en términos de transferencia de las ganancias de fuerza a los movimientos humanos más complejos aún se necesitan más investigaciones. Según Farthing et al., (2005), la dirección de la transferencia cruzada al entrenar el miembro dominante es más pronunciada. Por lo que futuras investigaciones deberán centrar su atención en la aplicación de este fenómeno en personas con situaciones transitorias o crónicas en las que un hemisferio corporal se encuentra en desuso, afectado o inmovilizado para conocer con precisión las características de la prescripción de ejercicio en este ámbito.

#### 5.4. EVIDENCIA DE EFECTO CRUZADO EN MIEMBROS HETERÓLOGOS: EFECTOS DEL ENTRENAMIENTO IPSILATERAL

Como se indica en los puntos anteriores, los efectos del entrenamiento de fuerza unilateral sobre el miembro contralateral no entrenado han sido ampliamente estudiados (Hendy y Lamon 2017; Manca et al., 2018; Manca et al., 2017). Este fenómeno se denomina efecto de educación cruzada (Davis, 1899). Numerosos estudios han demostrado que el entrenamiento de resistencia unilateral (ER) mejora no solo la fuerza muscular del miembro ipsilateral sino también la fuerza del músculo del miembro homólogo contralateral no entrenado (Carroll et al., 2006). Como hemos visto, se ha demostrado que la magnitud media del efecto de la educación cruzada sobre la fuerza muscular es del 21%, con un efecto mayor (27 %) en los músculos de los miembros inferiores en comparación con los músculos de los miembros superiores (13 %) (Hendy y Lamon, 2017; Manca et al., 2018; Manca et al., 2017). Aunque los mecanismos que subyacen a este efecto no están del todo dilucidados (Cirer-Sastre et al., 2017), se han propuesto mecanismos neurológicos y musculares (Hendy y Lamon, 2017): a) mecanismo neural, basado en la teoría de producir neuroplasticidad en ambos cerebros; cortezas (teoría de activación cruzada) (Hendy y Lamon, 2017), el desarrollo de nuevos engramas motores debido al nuevo aprendizaje motor (teoría de acceso bilateral) (Lee y Carroll, 2007) y la visualización del movimiento reduce la inhibición intracortical de la corteza cerebral ipsilateral (espejo). Teoría del entrenamiento) (Zult et al., 2015; Zult et al., 2014); b) mecanismos musculares, basados en las respuestas hormonales anabólicas/anticatabólicas circulantes relacionadas con la síntesis de proteínas reguladas por la vía Akt-mTOR (Schiaffino et al., 2013). En este sentido, el entrenamiento concéntrico-excéntrico en el que la acción de frenado se produce a alta velocidad y con sobrecarga excéntrica ha demostrado generar una mayor demanda neuromuscular (Maroto-Izquierdo et al., 2021), y de ese modo, una mayor demanda neural que podría inducir mayores cambios no solo sobre el miembro homólogo no entrenado, sino también sobre el miembro ipsilateral heterólogo no entrenado.

Según la literatura especializada, es ampliamente conocido que la educación cruzada es específica del grupo muscular homólogo y la magnitud de las ganancias contralaterales depende en gran medida de las obtenidas ipsilateralmente (Manca et al., 2017; Hortobagyi et al., 2005; Farthing et al., 2005). Sin embargo, el alcance de los efectos de la educación cruzada en los músculos héterologos aún no se ha dilucidado por completo. A lo largo de la literatura, varios autores han informado una mejora en la fuerza de los flexores del codo ipsilateral cuando se agregó un entrenamiento coadyuvante de la parte superior del cuerpo a un programa de entrenamiento de fuerza de la parte inferior del cuerpo (Hansen et al., 2001; Madarame et al., 2008; Bartolomei et al., 2018). Últimamente, Ben Othman et al., (2018), después de un programa de entrenamiento de 8 semanas (24 sesiones) que incluía el ejercicio de prensa de piernas unilateral, informaron efectos similares sobre la fuerza tanto en los músculos homólogos contralaterales no entrenados como en los músculos héterologos (flexores del codo) en participantes jóvenes. Además, las mayores magnitudes de cambios en la pierna no entrenada contralateral y el brazo no entrenado se mostraron después del entrenamiento con intensidades más altas en comparación con las intensidades más bajas (Ben Othman et al., 2018). Este fenómeno cruzado de abajo hacia arriba podría significar que los cambios neuronales inducidos por el entrenamiento de fuerza no solo generan cambios en la fuerza de la musculatura implicada, sino también en otras áreas del cuerpo no entrenadas. Por lo tanto, el uso del entrenamiento unilateral acentuado excéntricamente AEL como estrategia para lograr la optimización de la musculatura del miembro superior, tanto con fines deportivos como de rehabilitación, sin necesidad de su entrenamiento puede tener un gran potencial. Sin embargo, dada la necesidad de más evidencia científica sobre el posible alcance de los efectos de transferencia entre miembros inferiores y superiores (es decir, músculos héterologos ipsilaterales), y la evidente superioridad del entrenamiento excéntrico para promover cambios neuronales que conducen a mayores efectos de educación cruzada en fuerza. Se diseñó un estudio para analizar los efectos del entrenamiento de fuerza con sobrecarga excéntrica unilateral de la parte inferior del cuerpo sobre variables relacionadas con la fuerza de

la pierna entrenada y el brazo ipsilateral no entrenado y sobre la masa magra libre de grasa de ambos miembros en adultos jóvenes activos. Siendo la hipótesis principal que la realización del programa de entrenamiento unilateral del miembro inferior, podría generar un efecto de transferencia cruzada sobre diferentes manifestaciones de la fuerza significativa desde el miembro inferior entrenado al miembro superior no entrenado, sin prescribir un entrenamiento coadyuvante de la parte superior del cuerpo.

## 6. OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL:

Analizar el efecto ipsilateral del entrenamiento de fuerza unilateral con sobrecarga excéntrica realizado con el miembro inferior sobre la fuerza, la masa magra y la potencia mecánica del miembro superior no entrenado en sujetos físicamente activos.

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

1. Analizar el efecto ipsilateral del entrenamiento con sobrecarga excéntrica del miembro inferior sobre la fuerza máxima isométrica del miembro ipsilateral superior no entrenado.
2. Analizar el efecto ipsilateral del entrenamiento con sobrecarga excéntrica del miembro inferior sobre la fuerza máxima concéntrica dinámica del miembro ipsilateral superior no entrenado.
3. Analizar el efecto ipsilateral del entrenamiento con sobrecarga excéntrica del miembro inferior sobre la potencia mecánica a diferentes intensidades del miembro ipsilateral superior no entrenado.
4. Analizar el efecto ipsilateral del entrenamiento con sobrecarga excéntrica del miembro inferior sobre la masa magra libre de grasa del miembro ipsilateral superior no entrenado.
5. Comparar los efectos del entrenamiento con sobrecarga excéntrica sobre la mejora en la fuerza, la potencia, y la masa muscular en el miembro ipsilateral superior no entrenado entre hombres y mujeres.

## 7. METODOLOGÍA

### 7.1. DISEÑO GENERAL

Los participantes del grupo experimental realizaron 20 sesiones de ejercicio de prensa de pierna unilateral acentuado excéntricamente durante 10 semanas únicamente con la pierna dominante. Cada sesión consistió en 4 series de 8 repeticiones. El ejercicio de prensa de pierna se realizó con resistencia isotónica generada por un dispositivo de motor accionado eléctricamente en dos porcentajes diferentes del máximo de una repetición concéntrica 1-RM: 30% de 1-RM para la acción concéntrica y 105% de 1-RM para la acción excéntrica. Los participantes del grupo control no realizaron ningún programa de entrenamiento. Tanto la masa magra libre de grasa total de la pierna entrenada dominante (TL) como del brazo ipsilateral no entrenado (NTA) fueron evaluados mediante (DXA), así como el 1-RM, la contracción isométrica voluntaria máxima MVIC y la potencia muscular unilateral a diferentes intensidades (40, 60 y 80% del 1-RM), se evaluaron antes y después de la intervención.

En cuatro ocasiones antes de iniciar el programa de capacitación, todos los participantes asistieron a nuestro laboratorio. El día 1 se realizó DXA. Al día siguiente se realizaron la prueba de 1RM de prensas de piernas unilaterales y flexores de codo unilaterales. Un total de 48-72 horas más tarde, se evaluaron la MVIC y la potencia muscular a tres intensidades diferentes (40, 60 y 80% de 1RM) para ejercicios de prensa de piernas unilateral y flexor de codo. Una semana después de la intervención, se replicó el protocolo de evaluación en el mismo orden ya la misma hora del día. Las mediciones se realizaron tanto en la pierna entrenada TL como en el brazo ipsilateral no entrenado NTA. Se realizó un orden de extremidades individual y aleatorio antes de la prueba para cada participante y se repitió en las pruebas posteriores. Cada día que los participantes asistieron al laboratorio, se realizó un calentamiento de 5 min en una elíptica, 25 repeticiones de rodillas altas, 25 repeticiones de patadas a los glúteos y 2 series de 10 repeticiones de sentadillas con su propio peso corporal.

## 7.2. SUJETOS.

Sesenta y nueve estudiantes del Grado en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte participaron voluntariamente en el presente estudio (40 hombres:  $20,1 \pm 2,2$  años,  $76,1 \pm 7,8$  kg,  $178,9 \pm 5,7$  cm; y 29 mujeres:  $20,4 \pm 2,0$  años,  $60,2 \pm 7,1$  kg,  $165,1 \pm 5,6$  cm). Todos ellos fueron asignados aleatoriamente en un grupo experimental que realizó el programa de entrenamiento ( $n = 46$ ; 27 hombres, 19 mujeres) o en un grupo control sin entrenamiento ( $n = 23$ ; 13 hombres, 10 mujeres). La aleatorización se realizó mediante una aplicación en línea (<https://www.randomizer.at>), utilizando la opción de lista de aleatorización. La lista total de participantes se aleatorizó de manera que por cada tres participantes, el tercero se asignaba al grupo control. Los participantes eran individuos sanos y físicamente activos, que realizaban entre 6 y 8 horas de actividad física a la semana. Tenían antecedentes de entrenamiento sistemático con pesas y sin trastornos musculoesqueléticos previos durante los últimos 6 meses antes del entrenamiento. Antes y después de la intervención se registró el nivel de actividad física (IPAQ-2018). Los participantes en el grupo de control que aumentaron su nivel de actividad física o realizaron cualquier forma de entrenamiento con ejercicios de resistencia fueron eliminados del estudio. Además, se pidió a todos los participantes que mantuvieran sus hábitos de sueño, alimentación e hidratación durante el estudio. A los participantes no se les permitió tomar ayudas ergogénicas ni cambiar sus hábitos alimenticios durante la duración del estudio. También se les informó sobre el propósito del estudio y los riesgos que podrían surgir durante el entrenamiento antes de dar su consentimiento por escrito para participar. La Junta y el Comité de Ética de la Universidad de León aceptaron los protocolos del estudio (ETICA-ULE-009-2018). Todos los protocolos fueron realizados por los participantes, incluidas las pruebas previas y posteriores, el programa de capacitación y dos sesiones de familiarización.

### **7.3. ANÁLISIS DE ABSORCIOMETRÍA DE RAYOS X DE ENERGÍA DUAL (DXA)**

El DXA se realizó mediante un escáner de cuerpo entero Lunar Prodigy® (GE Medical Systems, Madison, WI, EE. UU.). Se realizó un análisis manual para estimar de forma independiente la masa magra total del muslo y del brazo (software Encore® 2009, Lunar Corp., Madison, WI, EEUU). Brevemente, se generó una marca rectangular utilizando el margen inferior de las tuberosidades isquiáticas y el margen inferior de los cóndilos femorales como puntos de referencia del muslo. Luego se calculó la masa magra para todo el muslo ((Maroto-Izquierdo et al., 2019) Posteriormente, se generó una marca rectangular secundaria desde el cuello quirúrgico del húmero hasta la punta de los dedos como puntos de referencia del brazo. Luego se calculó la masa magra para todo el brazo (Midorikawa et al., 2018), Finalmente, la estimación de la masa de tejido magro en los cortes de muslo total y brazo total creados se calculó utilizando el software (software Encore® 2009, Lunar Corp., Madison, WI, EEUU) tanto para la pierna entrenada como la para el brazo ipsilateral no entrenado.

### **7.4. FUERZA DINÁMICA MÁXIMA UNILATERAL (1-RM)**

El test de 1RM para miembro inferior se realizó mediante un dispositivo de prensa de piernas inclinadas con una inclinación de 45° (Gerva-Sport, Madrid, España). Los participantes realizaron una repetición desde 90° hasta extensión completa (180°) con una carga correspondiente a aproximadamente 3-RM. El punto de inicio (90° de flexión de la rodilla) fue medido con un goniómetro por un investigador individual y estaba limitado por una cadena de seguridad para marcar el inicio de cada repetición. Cuando el participante lograba superar una determinada carga, el peso aumentaba en 10 kg; y el peso se redujo en 5 kg cuando falló. El test de 1-RM finalizaba cuando el participante no lograba superar una carga dada en dos intentos sucesivos. El 1-RM unilateral de prensa de piernas se obtuvo en 3 a 6 intentos y con un tiempo de

recuperación de 2 min entre ellos. Durante la prueba, se pidió a todos los participantes que colocaran la pierna no entrenada con la rodilla flexionada pero relajada y el pie posado correctamente en el suelo.

La prueba de 1-RM de flexores unilaterales del codo se realizó en un dispositivo de pila de pesas Scott (Gerva-Sport, Madrid, España). Los participantes se posicionaron colocando el tórax y la fosa axilar en el banco Scott. Se pidió a los participantes que colocaran el brazo en reposo con el codo extendido y la mano apoyada sobre la rodilla ipsilateral. Un investigador individual midió los puntos de inicio ( $0^\circ$  de flexión del codo) y finalización con un goniómetro. Para saber que se alcanzaba el punto final en cada repetición del test de 1-RM se utilizó un codificador lineal (T-FORCE Dynamic Measurement System, Ergotech Consulting SL, Murcia, España) y el software asociado (T-Force v. 2.28). Utilizado para evaluar la distancia recorrida durante la ejecución. Los participantes realizaron una repetición desde extensión completa ( $0^\circ$ ) hasta  $90^\circ$  de flexión de codo con una carga aproximada de 3-RM. Cuando el participante lograba superar la carga dada, el peso aumentaba de 2 a 4 kg, y el peso se disminuía de 1 a 2 kg cuando fallaba. La prueba concluyó cuando el participante no pudo superar la carga dada en dos intentos sucesivos. El 1-RM unilateral de los flexores del codo se obtuvo entre 3 y 6 intentos y con un tiempo de recuperación de 2 min entre ellos. El test de 1-RM para cada miembro se realizó dos veces, el primero fue de 3 a 5 días antes del período de entrenamiento y el segundo de 3 a 5 días después del período de entrenamiento.

### **7.5. CONTRACCIÓN ISOMÉTRICA VOLUNTARIA MÁXIMA UNILATERAL**

La MVIC de prensa de piernas se evaluó a  $90^\circ$  de flexión de la rodilla en el mismo dispositivo de prensa de piernas descrito anteriormente. El dispositivo de prensa de piernas estaba equipado con un transductor de fuerza (GLOBUS Ge: S-Beam KM 1506 K, Art No 124 108, Megatron Elektronik AG, Putzbrunn, D, voltaje de

entrada:  $\pm 5$  V). El sensor se integró en la cadena de seguridad entre la barra de pesas y el asiento de la prensa de piernas, paralelo al riel central inclinado a  $45^\circ$ . De manera similar, la MVIC de los flexores del codo se evaluó a  $90^\circ$  de flexión del codo, empleando el mismo dispositivo de Scott y colocando a los participantes en la misma posición descrita anteriormente. En ese caso, el sensor de fuerza estaba integrado en una cadena colocada a  $45^\circ$  entre el suelo y la empuñadura. Se instruyó a los participantes para que realizaran dos contracciones isométricas máximas en rampa de 5 s para cada ejercicio probado. Los ensayos de prueba con instrucciones verbales para realizar con el máximo esfuerzo se dieron continuamente. Los datos del transductor de fuerza se muestrearon a 1000 (Hz) y se permitió un período de recuperación de 2 minutos entre intentos. Solo se utilizó la mejor repetición realizada con cada extremidad para un análisis posterior.

#### **7.6. POTENCIA MUSCULAR UNILATERAL A DIFERENTES INTENSIDADES**

Con el fin de evaluar la potencia muscular de las extremidades inferiores, se ejecutaron unilateralmente tres series de tres repeticiones concéntricas cada una desde una flexión de rodilla de  $90^\circ$  hasta una extensión completa ( $0^\circ$ ) en el dispositivo de prensa de piernas mencionado anteriormente. En el caso de la flexión del codo, la prueba partió de una extensión completa del codo ( $0^\circ$ ) hasta una flexión de  $90^\circ$ , en el mismo dispositivo descrito anteriormente. El tiempo de recuperación entre series para cada prueba consistió en 2 min. Cada intento partía de una posición estática completa para evitar la ayuda del ciclo de estiramiento-acortamiento CEA. Cada serie se realizó sobre un porcentaje de la carga de 1-RM (40%, 60% y 80%, respectivamente), con un orden individual y aleatorizado, que se replicó en el post-test. Se animó a los participantes a ejecutar la contracción concéntrica lo más rápido posible. La potencia media de cada repetición se muestreó a 1000 Hz utilizando un codificador lineal (T-FORCE Dynamic Measurement System, Ergotech Consulting S.L.,

Murcia, España) y el software asociado (T-Force v. 2.28). La mejor repetición realizada en cada carga se utilizó para análisis posteriores.

### 7.7. PROGRAMA DE ENTRENAMIENTO

Los participantes fueron colocados aleatoriamente en un grupo de entrenamiento experimental o en un grupo de control sin entrenamiento. Todos los participantes incluidos en el grupo experimental (hombres (n = 27); y mujeres (n = 20)) completaron 10 semanas (20 sesiones) de un programa de entrenamiento de prensa de piernas unilateral acentuado excéntricamente, utilizando un dispositivo de motor eléctrico (DME), (Exentrix, Smart - Coach™, Estocolmo, Suecia) (Maroto-Izquierdo et al., 2019). Los voluntarios entrenaron 2 veces por semana con al menos 48 h de descanso entre sesiones (Fernandez-Gonzalo et al., 2019). Después de un calentamiento estandarizado en bicicleta, los participantes realizaron 4 series de 8 acciones musculares máximas unilaterales (pierna dominante) acopladas concéntricas y excéntricas en un dispositivo de prensa de piernas horizontal hecho a medida. El dispositivo de motor eléctrico se configuró en modo isotónico (es decir, carga constante durante el ejercicio) mediante la configuración del software del dispositivo (Exentrix PC Interface-V2.4, SmartCoach™). Por lo tanto, se emplearon dos intensidades diferentes: una carga submáxima del 30 % de 1-RM en la acción concéntrica y una carga supramáxima del 105 % de 1-RM en la acción excéntrica. De acuerdo con las instrucciones del fabricante, se empleó un solo polipasto con una polea móvil simple para duplicar la fuerza generada por el motor. El tiempo de transición entre fases (excéntrica/concéntrica) se estableció como mínimo de acuerdo con los parámetros del sistema. Se pidió a los participantes que empujaran con el máximo esfuerzo durante toda la acción concéntrica, que osciló entre 90° de flexión de la rodilla y una extensión casi completa. Al final de la contracción concéntrica, la correa del motor se rebobina, comenzando la contracción excéntrica. Para cada participante en cada sesión y antes de iniciar la primera serie, se estableció

el rango de movimiento (ROM) desde la extensión completa ( $0^\circ$ ) hasta la flexión de rodilla de  $90^\circ$  a través de un goniómetro manual. Además del hecho de que una de las características del dispositivo motor accionado eléctricamente está habilitada para producir la sobrecarga excéntrica en todo el ROM (Maroto-Izquierdo et al., 2019; Tinwala y Haemmerle, 2017) Por lo tanto, se instruyó a todos los participantes del entrenamiento para que detuvieran el movimiento antes de llegar al final del ROM. También se les indicó que colocaran la pierna que no entrenaba extendida en el suelo y que no la utilizaran para producir fuerza durante la ejecución. La resistencia proporcionada por el motor eléctrico (un motor de CC sin escobillas) fue controlada por un controlador de potencia diseñado a medida (SmartCoach™, Estocolmo, Suecia) que controla en bucle cerrado las variables de velocidad y par. Para el lazo de control de velocidad, se utiliza un codificador incremental de alta precisión para medir la velocidad real. Para el lazo de control de par, se utiliza en su lugar la corriente medida en el devanado del motor. Con una técnica utilizada en automatización y robótica, el par real ( $T$ , Nm) se calcula a partir de la corriente. El motor está acoplado directamente a un eje de acero ( $D = 25$  mm) sobre el que se enrolla la cuerda. Dado que el eje está soportado por un cojinete de bolas de baja fricción y el acoplamiento entre el sujeto y el motor es directo (sin engranajes ni poleas), la fuerza se puede calcular dividiendo el par por el brazo de palanca ( $b = D/2 + d/2$ , donde ( $d$ ) es el diámetro del cable. Por lo tanto,  $F = T/b$ . Por lo tanto, se midieron la fuerza y la potencia media y máxima en cada repetición tanto para las contracciones concéntricas como para las excéntricas (SmartCoach™, Estocolmo, Suecia), con retroalimentación mostrada en el monitor de la computadora en tiempo real. Todos los participantes del grupo de entrenamiento tuvieron dos sesiones de familiarización antes del entrenamiento, mientras que el grupo de no entrenamiento (control) recibió instrucciones de no involucrarse en ningún programa de entrenamiento de fuerza durante todo el período de estudio.

## 7.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis estadístico se realizó con SPSS v.26.0.0 (SPSS Inc., Chicago, IL, EE. UU.), y con el software libre R v. 4.1.9. Los resultados se expresaron como media  $\pm$  SD. Se examinó la normalidad de la distribución de datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Se utilizó un análisis de varianza de cuatro vías con medidas repetidas (grupo  $\times$  tiempo  $\times$  miembro  $\times$  sexo) y un ajuste de Bonferroni post hoc fue utilizado para investigar las diferencias entre las variables tras el programa de entrenamiento entre participantes, entre miembros y entre sexos. El tamaño del efecto (ES) se calculó para las interacciones entre grupos utilizando las pautas de Cohen. Los valores umbral para el (ES) fueron  $>0,2$  (pequeño),  $>0,6$  (grande) y  $>2,0$  (muy grande) (Hopkins et al., 2009). Además, se utilizó la  $r$  de Pearson para determinar las correlaciones lineales entre las ganancias del miembro entrenado y el porcentaje de ganancia del miembro no entrenado, incluyendo todos los grupos de entrenamiento. Las diferencias observadas entre los cambios porcentuales después del entrenamiento en cada pierna se calcularon mediante la prueba  $t$  de muestras pareadas. El nivel de significación se fijó en  $p < 0,05$ . También se comparó la magnitud de los cambios de cada extremidad para el grupo experimental entre hombres y mujeres.

Con ese propósito, se calcularon las diferencias de medias estandarizadas de cambio (SCMD) utilizando las siguientes ecuaciones (Morris, 2008):

$$SCMD = c(df_{men,women}) \cdot \left[ \frac{(\bar{X}_{post,men} - \bar{X}_{pre,men}) - (\bar{X}_{post,women} - \bar{X}_{pre,women})}{\bar{S}_{pre}} \right]$$

Donde “dfmen, women” se refiere al grado de libertad de hombres y mujeres del grupo experimental, respectivamente. Donde “Spre” es la desviación estándar agrupada del grupo experimental en el pretest, la cual fue calculada por:

$$\bar{S}_{pre} = \sqrt{\frac{(n_{men} - 1) \cdot S_{pre,men}^2 + (n_{women} - 1) \cdot S_{pre,women}^2}{n_{men} + n_{women} - 2}}$$

Donde “ $\bar{S}_{pre,men}$ ” se refiere a la varianza de la medición previa en el grupo de hombres y “ $\bar{S}_{pre,women}$ ” se refiere a la varianza de la medición previa en el grupo de mujeres.

Además, “ $c(df_{men, women})$ ”, es el factor de corrección, el cual fue obtenido por (Hedges, 1981):

$$c(df_{men, women}) = 1 - \left[ \frac{3}{4(n_{men} + n_{women} - 2) - 1} \right]$$

La varianza del SCMD se calculó como:

$$S^2_{SCMD} = [c(df_{men,women})]^2 \cdot 2(1-r) \cdot \left[ \frac{n_{men} + n_{women}}{n_{men} \cdot n_{women}} \right] \cdot \left[ \frac{n_{men} + n_{women} - 2}{n_{men} + n_{women} - 4} \right] \cdot \left[ 1 + \frac{n_{men} \cdot n_{women} \cdot SMD^2}{2 \cdot (1-r) \cdot (n_{men} + n_{women})} \right] - SCMD^2$$

Donde “ $r$ ” es el coeficiente de correlación promedio entre las medidas pre y post en ambos sexos. El coeficiente de correlación entre las mediciones previas y posteriores para ambos sexos se calculó a partir de la desviación estándar de la puntuación de cambio “ $SD_{diff}$ ” en cada condición sexual. La SCMD se consideró trivial (<0,20), pequeña (0,20–0,59), moderada (0,60–1,19), grande (1,20–1,99) y muy grande (>2,00) (Hopkins, 2021). Las estimaciones de la varianza entre variables se calcularon mediante un modelo de efectos aleatorios (ajuste de Hartung-Knapp/Sidik-Jakman (HKSJ)) con un intervalo de confianza del 95% (IC95%). La consistencia de los efectos encontrados se evaluó mediante las pruebas de heterogeneidad ( $I^2$ ) y Tau cuadrado ( $\tau^2$ ), considerándose  $I^2$  pequeño (<25%), moderado (25-49%) y alto (>50%). Además, se incluyeron  $\tau^2$  y el intervalo de predicción (PI) porque  $\tau^2$  no puede señalar fácilmente las implicaciones clínicas de la heterogeneidad no observada (IntHout et al., 2016) El intervalo de predicción permite una mejor evaluación clínica de los resultados obtenidos porque representa el rango en el cual el tamaño del efecto de un estudio futuro realizado sobre el tema será más probable (es decir, la probabilidad

de efecto positivo verdadero). Los intervalos de predicción y la probabilidad de los cálculos de efectos positivos verdaderos se realizaron de acuerdo con estudios previos (IntHout et al., 2016)

## 8. RESULTADOS

La potencia máxima promedio para la fase concéntrica aumentó ( $p < 0,01$ ) desde la primera hasta la última sesión de entrenamiento en ambos sexos, pero el aumento fue similar entre hombres ( $438,5 \pm 72,3$ – $791,1 \pm 105,1$  W) y mujeres ( $349,7 \pm 67,4$ – $642,9 \pm 120,5$  W). La sobrecarga excéntrica media en términos de potencia relativa a la potencia pico media concéntrica fue similar entre los grupos,  $67,7 \pm 8,0$  % en hombres (CON:  $521,8 \pm 107,9$  W; ECC:  $875,8 \pm 106,6$  W) y  $59,3 \pm 36,1$  % en mujeres (CON:  $496,4 \pm 163,0$  W; ECC:  $746,0 \pm 140,9$  W). La fuerza pico generada en la fase excéntrica en relación con la fuerza pico media concéntrica fue del  $74,6 \pm 1,1$  % en hombres (CON:  $318,5 \pm 9,9$  N; ECC:  $1256,5 \pm 29,1$  N) y del  $70,7 \pm 3,3$  % en mujeres (CON:  $307,6 \pm 12,0$  N; ECC:  $1053,3 \pm 36,0$  N). La velocidad concéntrica media (hombres:  $2,03 \pm 0,34$ – $2,99 \pm 0,43$  m/s; mujeres:  $1,80 \pm 0,31$ – $2,71 \pm 0,22$  m/s) y la velocidad de fase concéntrica máxima (hombres:  $2,72 \pm 0,40$ – $3,68 \pm 0,30$  m/s; mujeres:  $2,30 \pm 0,30$ – $3,69 \pm 0,21$  m/s) fueron similares entre sexos, pero la velocidad media de la fase excéntrica fue significativamente más lenta ( $p < 0,01$ ) en hombres ( $1,06 \pm 0,21$ – $1,42 \pm 0,17$  m/s) y mujeres ( $0,82 \pm 0,15$ – $1,39 \pm 0,28$  m/s).

En las tablas (2) y (3) se muestran los resultados de los cambios pre-post observados en la pierna entrenada y en el brazo ipsilateral no entrenado tanto en hombres (Tabla 2), como en mujeres (Tabla 3), tanto del grupo experimental como del control. No se observaron correlaciones significativas entre la magnitud del cambio en la TL y en la NTA para ninguna variable (1-RM:  $r = 0,148$ ,  $p = 0,333$ ; MVIC:  $r = -0,259$ ,  $p = 0,083$ ; potencia media concéntrica a baja intensidad:  $r = -0,128$ ,  $p = 0,406$  Potencia media concéntrica a intensidad media:  $r = -0,112$ ,  $p = 0,476$  Potencia media concéntrica a intensidad alta:  $r = -0,146$ ,  $p = 0,368$  TLM:  $r = -0,269$ ,  $p = 0,078$ ).

Tabla 2. Cambios (media  $\pm$  SD) en la fuerza máxima de una repetición unilateral (1-RM), contracción isométrica voluntaria máxima unilateral (MVIC), potencia media concéntrica en baja (PLL, 40% de 1-RM), media (PML, 60% de 1-RM), y cargas altas (PHL, 80% de 1-RM), y masa total de tejido magro (TLTM), para la pierna entrenada (TL) y brazo no entrenado (NTA) para el entrenamiento grupo y grupo control antes (Pre) y después del entrenamiento (Post) en hombres (H). El valor p para la comparación entre los valores previos y posteriores al entrenamiento mediante la prueba de Bonferroni, y el tamaño del efecto (ES) para los cambios, la magnitud del cambio (%) se muestran para cada extremidad.

Hombres	Pierna entrenada					Brazo ipsilateral no entrenado				
	Pre	Exponer	P	ES	%	Pre	Exponer	P	ES	%
<b>Grupo experimental (n = 27)</b>										
1-RM (kg)	183,3 $\pm$ 8,5	202,6 $\pm$ 5,5	0.013	0.72	10.5	32,9 $\pm$ 1,4	47,8 $\pm$ 1,5 <sup>^</sup>	<0,001	2.02	45.2 *
MVIC (kg)	78,3 $\pm$ 3,6	89,8 $\pm$ 3,9	<0,001	0.67	14.7	19,6 $\pm$ 0,8	23,2 $\pm$ 0,7	<0,001	0.91	18.2
PLL (W)	426,3 $\pm$ 12,9	494,4 $\pm$ 12,8	<0,001	1.20	16.0	31,3 $\pm$ 2,1	49,7 $\pm$ 1,9 <sup>^</sup>	<0,001	1.71	59.0 *
LMP (W)	448,9 $\pm$ 15,7	496,5 $\pm$ 13,1	<0,001	0.78	10.6	52,0 $\pm$ 2,9	76,5 $\pm$ 2,7 <sup>^</sup>	<0,001	1.49	47.1 *
PHL (W)	417,1 $\pm$ 16,6	456,9 $\pm$ 15,4	0.033	0.46	9.5	57,1 $\pm$ 3,3	68,3 $\pm$ 3,2	0.002	0.68	19.6
TLTM (mm)	6528.9 $\pm$ 123.1	6797.6 $\pm$ 123.0	<0,001	0.45	4.1 *	3882.1 $\pm$ 78.4	3857.9 $\pm$ 79.0	0.371	0.06	-0.6
<b>Grupo de control (n = 13)</b>										
1-RM (kg)	223,8 $\pm$ 12,3 <sup>^</sup>	188,5 $\pm$ 7,9	0.002	0.99	-15.8	38,9 $\pm$ 2.0 <sup>^</sup>	39,5 $\pm$ 2,1	0.710	0.06	1.6 *
MVIC (kg)	83,2 $\pm$ 5,4	87,4 $\pm$ 5,8	0.370	0.20	5.0	21.1 $\pm$ 1.3	23,5 $\pm$ 1,2	0.053	0.39	9.8
PLL (W)	520,7 $\pm$ 18,2 <sup>^</sup>	491,1 $\pm$ 18,1	0.007	0.30	-5.7	41,8 $\pm$ 3,0 <sup>^</sup>	40,2 $\pm$ 2,8	0.426	0.11	-3.8
LMP (W)	545,3 $\pm$ 22,6 <sup>^</sup>	588,9 $\pm$ 92,4	0.155	0.17	-3.7	67,9 $\pm$ 4,2 <sup>^</sup>	64,2 $\pm$ 3,8	0.173	0.19	-5.5
PHL (W)	484,3 $\pm$ 24,0 <sup>^</sup>	506,4 $\pm$ 22,1	0.404	0.18	4.5 *	77,4 $\pm$ 4,8 <sup>^</sup>	57,7 $\pm$ 4,6	<0,001	0.77	-25,5
TLTM (mm)	7236,6 $\pm$ 177,4 <sup>^</sup>	7163,4 $\pm$ 177,3	0.120	0.08	-1,0	4151,1 $\pm$ 113,1	4176,1 $\pm$ 113,9 <sup>^</sup>	0.518	0.04	0.6

\*: una diferencia significativa ( $p < 0,05$ ) para la magnitud de los cambios entre TL y NTA.: una diferencia significativa ( $p < 0,05$ ) entre los grupos.<sup>^</sup>

Tabla 3. Cambios (media  $\pm$  SD) en la fuerza máxima de una repetición unilateral (1-RM), contracción isométrica voluntaria máxima unilateral (MVIC), potencia media concéntrica en baja (PLL, 40% de 1-RM), media (PML, 60% de 1-RM), y cargas altas (PHL, 80% de 1-RM), y masa total de tejido magro (TLTM), para la pierna entrenada (TL) y brazo no entrenado (NTA) para el entrenamiento grupo y grupo control antes (Pre) y después del entrenamiento (Post) en mujeres (M). El valor p para la comparación entre los valores previos y posteriores al entrenamiento mediante la prueba de Bonferroni, y el tamaño del efecto (ES) para los cambios, la magnitud del cambio (%) se muestran para cada extremidad.

Mujeres	Pierna entrenada					Brazo ipsilateral no entrenado				
	Pre	Exponer	P	ES	%	Pre	Exponer	P	ES	%
<b>Grupo de formación (n = 19)</b>										
1-RM (kg)	113,9 $\pm$ 10,1	137,4 $\pm$ 6,6	0.015	0.86	20.6	12,9 $\pm$ 1,6 <sup>^</sup>	21,8 $\pm$ 1,8 <sup>^</sup>	<0,001	1.24	69.4 *
MVIC (kg)	52,8 $\pm$ 4,3	55,9 $\pm$ 4,6 <sup>^</sup>	0.411	0.14	5.7	10,7 $\pm$ 1,0	14,3 $\pm$ 0,9 <sup>^</sup>	<0,001	1.02	32.8 *
PLL (W)	251,7 $\pm$ 15,4	294,8 $\pm$ 15,4	<0,001	0.77	17.1	9.2 $\pm$ 2.5	15,7 $\pm$ 2,3	<0,001	1.04	72.6 *
LMP (W)	279,1 $\pm$ 20,3	322,4 $\pm$ 17,0	0.001	0.69	15.5	16,5 $\pm$ 3,8	26,5 $\pm$ 3,4 <sup>^</sup>	<0,001	1.18	60.8 *
PHL (W)	272,2 $\pm$ 24,0	275,2 $\pm$ 22,1	0.909	0.08	1.1	19,2 $\pm$ 4,8	29,4 $\pm$ 4,6 <sup>^</sup>	0.039	0.99	53.3 *
TLTM (mm)	4268,5 $\pm$ 155,1	4407.6 $\pm$ 155.0 <sup>^</sup>	0.001	0.31	3.3 *	2180,3 $\pm$ 98,9	2193.3 $\pm$ 99.6	0.703	0.04	0.6
<b>Grupo de control (n = 10)</b>										
1-RM (kg)	142,5 $\pm$ 14,0	109,0 $\pm$ 9,1	0.010	0.49	-23.5	8.5 $\pm$ 2.3	8.6 $\pm$ 2.4	0.985	0.01	0.4
MVIC (kg)	39,2 $\pm$ 5,9	44,3 $\pm$ 6,4	0.311	0.29	13.1	10.3 $\pm$ 1.4	10,7 $\pm$ 1,2	0.781	0.12	3.5
PLL (W)	241,6 $\pm$ 29,3	240,6 $\pm$ 29,2	0.953	0.05	-0.4	7.3 $\pm$ 4.8	8,7 $\pm$ 4,5	0.662	0.77	19.4 *
LMP (W)	237,4 $\pm$ 25,7	248,0 $\pm$ 21,5	0.504	0.21	4.5	10,2 $\pm$ 4,8	10,9 $\pm$ 4,4	0.816	0.15	7.1
PHL (W)	213,1 $\pm$ 28,8	222,8 $\pm$ 26,6	0.760	0.25	4.5 *	13,9 $\pm$ 5,8	14,3 $\pm$ 5,6	0.952	0.05	2.5
TLTM (mm)	3838,5 $\pm$ 202,9	3807.1 $\pm$ 202.1	0.555	0.05	-0,8	1904.9 $\pm$ 128.9	1895.1 $\pm$ 129.8	0.827	0.04	-0,5

\*: Una diferencia significativa ( $p < 0,05$ ), para la magnitud de los cambios entre TL y NTA.diferencia significativa ( $p < 0,05$ ) entre grupo

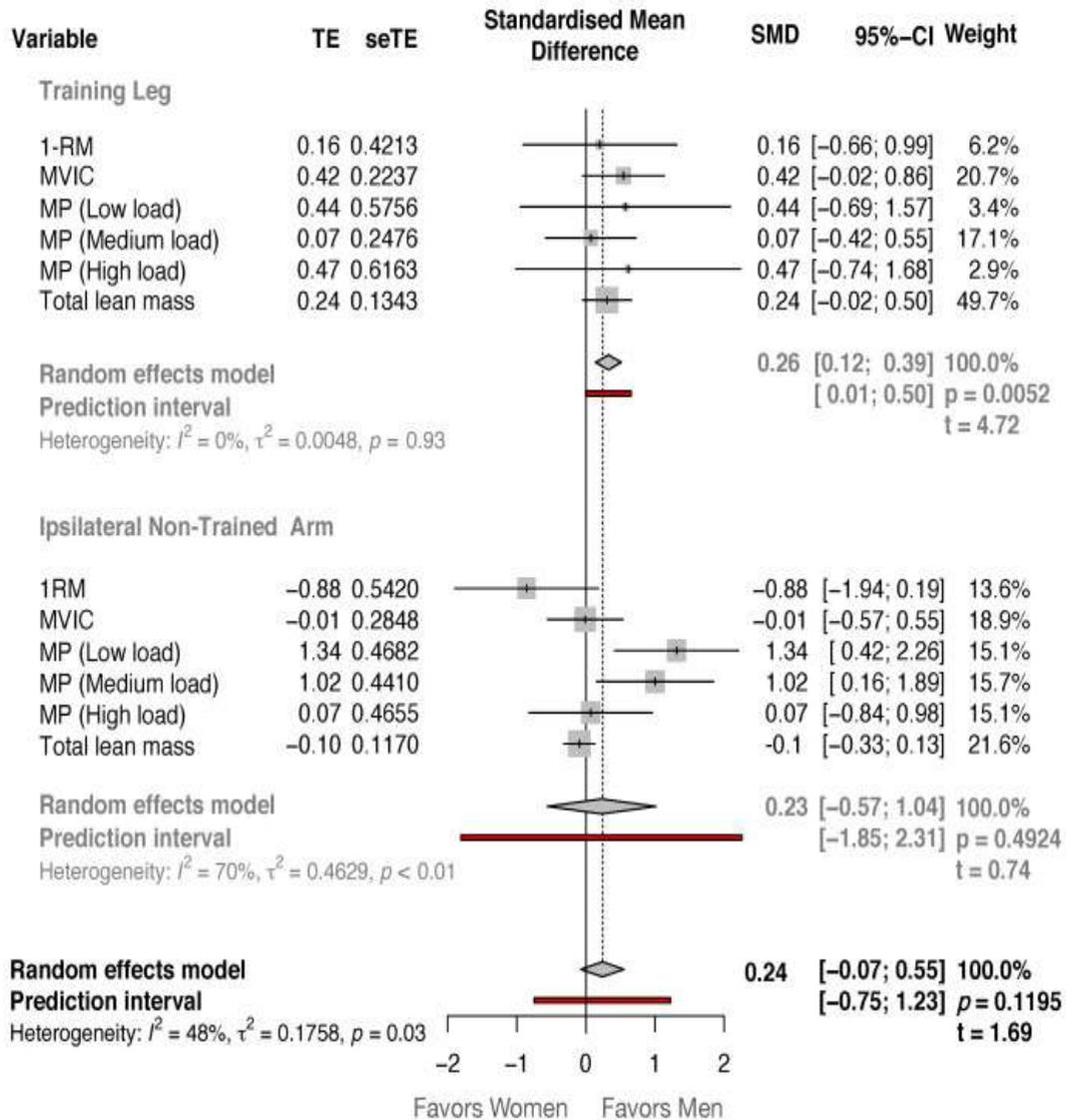


Figura 10. Florest plot que muestra la diferencia en las diferencias medias estandarizadas entre hombres (lado derecho de la línea negra vertical) y mujeres (lado izquierdo de la línea negra vertical) en la pierna de entrenamiento (TL) y en el brazo no entrenado (NTA).

## 9. DISCUSIÓN

Con el presente estudio se examinó los efectos del entrenamiento de fuerza con una carga excéntrica unilateral acentuada sobre los cambios Funcionales, y en la masa muscular de la pierna entrenada TL y el brazo ipsilateral no entrenado NTA, tanto en hombres como en mujeres. Después de 20 sesiones del protocolo de entrenamiento con sobrecarga excéntrica, se encontraron aumentos comparables en la fuerza máxima dinámica e isométrica unilateral y en la potencia muscular unilateral con diferentes cargas tanto para TL como para NTA (Tablas 3 y 4).

Estos resultados, (aunque no se encontraron correlaciones significativas entre la magnitud de los cambios en cualquier variable entre la pierna entrenada TL y el brazo no entrenado NTA), mostraron un fuerte efecto de transferencia cruzada de la parte inferior a la parte superior del cuerpo, después del entrenamiento de fuerza unilateral de los miembros inferiores con sobrecarga excéntrica en los factores relacionados con la fuerza. Sin embargo, no se observaron ganancias significativas en la masa de tejido magro en el NTA después del protocolo de intervención. Además, los hombres mostraron en general mayores ganancias en la TL cuando se comparó la magnitud de los cambios de todas las variables (Figura X), pero esto no se observó en la NTA, mostrando cambios similares entre sexos.

Se ha demostrado que un RT a corto plazo con sobrecarga excéntrica inducida por dispositivos de motor eléctrico o por las máquinas flywheel, aumente efectivamente la fuerza muscular, la potencia, la masa magra y el rendimiento del salto vertical en la TL (Maroto-Izquierdo et al., 2019; (Maroto-Izquierdo et al., 2020) Estos resultados son consistentes con los resultados mostrados por el TL en el presente estudio. Aunque los mecanismos subyacentes de las mejoras neuromusculares que se muestran aún no se han dilucidado ampliamente, pueden explicarse por las diferencias específicas de la tarea y la carga utilizada para las contracciones concéntricas y excéntricas (Wagle et al., 2017).

Dado que una mayor carga de la fase excéntrica puede conducir a una activación mejorada de la corteza motora (Gruber et al., 2009), compensando la inhibición espinal y mejorando el impulso neural (Moore et al., 2007) incorporando el reclutamiento selectivo de unidades motoras de alto umbral y estimulando los nervios aferentes del tipo Ia (Bobbert et al., 1996), lo que a su vez da como resultado una disminución de los potenciales motores evocados y la respuesta del reflejo H y un patrón de activación de la unidad motora especializada durante la fase excéntrica en comparación con la concéntrica (Enoka, 1996; Duchateau y Enoka. 2016). Por lo tanto, estos cambios neuronales específicos de la tarea pueden optimizar el rendimiento en aquellas actividades en las que está involucrado el ciclo de estiramiento-acortamiento (Wagle et al., 2017) Además, la hipertrofia muscular también contribuye probablemente a los cambios de rendimiento favorables observados después de AEL (Maroto-Izquierdo et al., 2017).

Por lo tanto, AEL ha demostrado favorecer los aumentos en la longitud del fascículo y la hipertrofia de las porciones distales de un músculo (tradicionalmente asociado con el entrenamiento solo excéntrico) mientras mantiene los cambios musculares proximales (es decir, aumentos del ángulo de penetración y mayor hipertrofia del músculo medio) asociados con RT tradicional (Franchi et al., 2014). Por lo tanto, los cambios en el rendimiento explosivo pueden atribuirse a una mayor velocidad de contracción a través de la hipertrofia específica en serie del estímulo con sobrecarga excéntrica, mientras que los cambios en la fuerza pueden deberse a la hipertrofia específica en paralelo de dicho estímulo (Franchi et al., 2014).

A pesar de los cambios en la arquitectura muscular, se ha demostrado que AEL provoca mejoras en los factores involucrados en la señalización anabólica, como varios factores de crecimiento similares a la insulina, factores reguladores miogénicos o la testosterona (Friedmann et al., 2010), que a su vez da como resultado mayores ganancias de fibras del tipo IIx y IIa, específicas del área de la sección transversal, (Friedmann et al., 2010), además una disminución del porcentaje de las fibras del tipo I, y un aumento en el porcentaje de las fibras del tipo IIx y IIa especialmente en

aquellos grupos musculares involucrados en un programa de entrenamiento excéntrico con sobrecarga (Friedmann et al., 2004).

Todos estos factores tomados en su conjunto pueden explicar los aumentos relativamente grandes observados en 1-RM, MVIC, potencia mecánica a diferentes intensidades y masa muscular en el LT después de un programa de RT con sobrecarga excéntrica. Además, podría explicar la superioridad de los efectos inducidos por el entrenamiento AEL en hombres en comparación con las mujeres para el TL. Sin embargo, no se han explorado los efectos del AEL unilateral en la extremidad contralateral no entrenada. No obstante, es bien sabido que el ejercicio de resistencia unilateral aumenta la fuerza muscular de los músculos homólogos contralaterales no entrenados, lo que se denomina efecto de educación cruzada o transferencia cruzada (Hendy et al., 2017; Manca et al., 2018; Manca et al., 2015; Green et al., 2018).

Green y Gabriel, (2018), en su artículo de revisión, informaron que la magnitud del aumento de la fuerza muscular para la extremidad contralateral no entrenada osciló entre el 52 y el 80% de la de la extremidad entrenada. De hecho, nos ha llevado a plantear la hipótesis de que no solo el miembro homólogo no entrenado puede mostrar cambios de transferencia cruzada, sino también el miembro superior ipsilateral no entrenado. En el presente estudio, se observó un aumento en 1-RM y MVIC en los flexores del codo NTA después de un programa AEL de 10 semanas tanto en hombres (1-RM: 10,5%; MVIC: 14,7%) como en mujeres (1-RM: 20,6%; MVIC: 69,4%). Aunque las mujeres mostraron tamaños de efecto mayores en los cambios en (NTA) para fuerza concéntrica e isométrica, no se encontraron diferencias significativas para la magnitud del cambio entre sexos. Además, estos resultados están en línea con estudios previos.

De manera similar, Ben Othman et al., (2018) informaron ganancias significativas (3,3%) en la MVIC unilateral de flexión del codo. Desafortunadamente, Ben Othman et al., (2018) no informaron datos con respecto a los flexores del codo 1-RM para comparar con los hallazgos de nuestro estudio. Se refirieron al efecto de transferencia cruzada de la parte inferior a la superior del cuerpo de TL ipsilateral a

NTA ipsilateral como los efectos de entrenamiento global. Ya que, como se ha demostrado en nuestro estudio, la magnitud de las ganancias de fuerza del NTA ipsilateral no es dependiente de las obtenidas ipsilateralmente en la LT.

Además, los resultados del presente estudio sugieren que con la implementación de AEL de miembros inferiores, la relación fuerza-velocidad podría expresarse mejor no solo en el TL ipsilateral sino también en el NTA ipsilateral. Dado que la potencia muscular en cargas bajas (hombres: 59,0%, mujeres: 72,6%), medias (hombres: 47,1%, mujeres: 60,8%) y cargas altas (hombres: 19,6%, mujeres: 53,3%) aumentó significativamente en la NTA con la diferencia entre sexos favorece a los hombres con cargas bajas y medias (Figura 11).

Sin embargo, estos resultados deben tomarse con cautela ya que este estudio fue el primero en analizar y comparar los cambios en la potencia media concéntrica a diferentes intensidades de 1-RM en el ejercicio de flexión de codo después de una intervención de EF de miembros inferiores. Además, no se encontró una correlación significativa entre la magnitud de los cambios en la TL y en la NTA. No obstante, como se propone a continuación, las adaptaciones neuronales probablemente sean responsables de la fuerza y los cambios relacionados con la fuerza, observados en el NTA. Finalmente, aunque tanto hombres como mujeres mostraron ganancias similares en la masa magra total del muslo (4.1 y 3.3%, respectivamente) en el TL después del programa RT. Sin embargo, la NTA no mostró ganancias significativas en la masa magra. Por lo tanto, como lo han propuesto estudios previos con respecto al efecto de educación cruzada. (Hendy et al., 2017; Manca et al., 2018), los aumentos contralaterales tempranos en la fuerza muscular no están asociados con ganancias de masa magra en NTA. Lo que a su vez, se debe en gran parte a que no se han encontrado adaptaciones vasculares significativas (Zoeller et al., 2009) ni cambios histológicos en los niveles de hipertrofia, en la concentración de enzimas, en la alteración de la composición proteica contráctil, en el tipo de fibra, o en sección transversal CSA en la NTA ipsilateral después de RT unilateral de miembros inferiores (Carroll et al., 2006). Por lo tanto, la magnitud similar de aumentos en la función

muscular entre TL y NTA encontrada en el presente estudio puede atribuirse solo a adaptaciones neurales. (Hendy et al., 2017; Manca et al., 2018; Carroll et al., 2006).

Sin embargo, la naturaleza exacta de las adaptaciones neuronales sigue sin estar clara. Al tratar de explicar estas adaptaciones, actualmente se postulan dos teorías que, aunque compatibles entre sí, pueden explicar cómo ocurren los mecanismos de adaptación neural (Ruddy et al., 2013) (a) el modelo de “activación cruzada”, que sugiere que las adaptaciones al ejercicio unilateral extienden a la mitad opuesta del cuerpo, y (b) el modelo de “acceso bilateral”, que sostiene que el esquema motor de una tarea unilateral es accesible tratando de reproducir la misma tarea en la mitad opuesta del cuerpo. En cuanto a los cambios observados en el sistema nervioso, estos pueden ocurrir a nivel periférico, medular, subcortical y cortical (Lee y Carrol, 2007) A nivel periférico y medular, diversos estudios sugieren la existencia de alteraciones en la sincronización de las unidades motoras y de la conductividad neural similares a las observadas en el lado entrenado (Carroll et al., 2006), a nivel subcortical y cortical, existe alguna evidencia que confirma la existencia de interacción neural entre los dos hemisferios (Carroll et al., 2006; Farthing et al., 2007), apoyando así el modelo de activación cruzada sugerido por Ruddy y Carson (2013). Además de todo lo anterior, parece que el aprendizaje motor provoca reorganizaciones corticales (Carroll et al., 2006), y que el ejercicio unilateral produce plasticidad interhemisférica (Farthing et al., 2014) apoyando así el modelo de acceso bilateral. Investigaciones más recientes que emplean estimulación magnética transcraneal han informado de aumentos en la excitabilidad corticoespinal del bíceps braquial contralateral (Kidgel et al., 2015), así como una disminución de la inhibición corticoespinal del cuádriceps contralateral (Latella et al., 2012) cuando se realiza ejercicio de resistencia de las extremidades inferiores. Kidgel et al., (2015), informaron que el entrenamiento solo excéntrico redujo la inhibición intracortical, la duración del período de silencio y aumentó la excitabilidad corticoespinal en mayor medida en comparación con el entrenamiento solo concéntrico. Además de las posibles adaptaciones neuronales, los sujetos novatos, sin entrenamiento y sin experiencia pueden mostrar mayores adaptaciones debido a una mayor coordinación

y efectos de aprendizaje, mientras que los individuos bien entrenados pueden enfatizar más adaptaciones morfológicas y neuronales (reclutamiento y codificación de velocidad) (Behringer et al., 2011). Cabe señalar que el control motor, el aprendizaje, la coordinación y algunos cambios estructurales mejoraron en mayor medida en la pierna entrenada TL, mientras que las adaptaciones NTA del músculo heterólogo habrían dependido más de las adaptaciones neurales (Kidgell et al., 2015; Lee y Carrol. 2007; Farthing et al., 2007; Latella et al., 2012; Evetovich, et al., 2001). Hubo algunas limitaciones en el presente estudio. Aunque es interesante ver aumentos relativamente grandes en la función muscular en el presente estudio, se deben investigar más las adaptaciones musculares también en la extremidad no entrenada heteróloga NTL para comparar la magnitud de los cambios en NTA y NTL.

Además, a pesar de que la muestra era muy homogénea en cuanto a edad y experiencia formativa, sería interesante replicar este estudio con diferentes grupos de edad para estudiar el efecto de la edad y el estado de salud. Además, aunque la participación de la NTA en el ejercicio fue mínima (las manos se colocaron en los asideros del asiento del dispositivo), no evaluamos la activación muscular (es decir, electromiografía) durante el ejercicio en los flexores del codo.

Esta es una limitación del presente estudio ya que podría aportar detalles adicionales sobre los cambios en la NTA, de hecho, la medición de la activación muscular durante el ejercicio y la excitabilidad e inhibición corticoespinal podría proporcionar una visión más profunda de los efectos de transferencia cruzada de la parte inferior a la superior del cuerpo. Además, se justifica comparar la magnitud del efecto de transferencia cruzada de la parte inferior a la parte superior del cuerpo entre la carga tradicional concéntrica-excéntrica, solo excéntrica y excéntrica acentuada. Finalmente, parece que la carga excéntrica acentuada unilateral es un activo interesante en entornos clínicos y de rehabilitación, específicamente con pacientes que tienen una extremidad inmovilizada o trastornos neurológicos (como esclerosis múltiple o pacientes con accidente cerebrovascular), lo que les permite mantener sus niveles de fuerza y masa muscular en el miembro ipsilateral

inmovilizado o afectado. Sin embargo, la viabilidad de este enfoque en un entorno clínico sigue siendo desconocida.

## 10. CONCLUSIONES

En conclusión, la presente tesis doctoral ha demostrado que el entrenamiento unilateral acentuado excéntricamente es una estrategia efectiva para mejorar la función neuromuscular y generar adaptaciones estructurales en el miembro entrenado. Los principales resultados de esta tesis destacan que 10 semanas (20 sesiones) de entrenamiento de fuerza con sobrecarga excéntrica aplicado sobre el miembro inferior dominante condujeron a ganancias significativas en la fuerza máxima dinámica concéntrica 1-RM, en la fuerza pico desarrollada durante una contracción voluntaria isométrica máxima, en la potencia mecánica desarrollada a diferentes intensidades y en la masa magra libre de grasa del miembro entrenado tanto en hombres como mujeres físicamente activos. Aunque los cambios inducidos por el protocolo de entrenamiento prescrito en la pierna entrenada fueron mayores en hombres que en mujeres. Además, los resultados de esta tesis han demostrado que el entrenamiento de fuerza con sobrecarga excéntrica aplicado en el miembro inferior tiene un efecto ipsilateral sobre el miembro superior del mismo hemisferio corporal no entrenado de una magnitud similar a la del efecto directo del entrenamiento sobre el miembro inferior entrenado tanto para hombres como para mujeres físicamente activos. Sin embargo, a diferencia de los efectos inducidos por el entrenamiento sobre el miembro entrenado, no se encontraron cambios significativos en la masa magra libre de grasa en el miembro superior ipsilateral, ni en el caso de los hombres ni en el caso de las mujeres. A pesar de que este es el primer trabajo científico que ha demostrado la presencia de un alto efecto ipsilateral tras el entrenamiento con sobrecarga excéntrica, sin embargo, dado que no se realizó ninguna medición neurofisiológica, podemos establecer que se necesitan más estudios para investigar los posibles mecanismos neurales que sustentan este fenómeno de transferencia cruzada de la parte inferior a la parte superior del cuerpo inducidos por el entrenamiento acentuado excéntricamente. También es necesario

investigar la efectividad de este nuevo paradigma de entrenamiento de fuerza en contextos clínicos y de rehabilitación.

## 11. REFERENCIAS

### A

- Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson SP, Halkjaer-Kristensen J & Dyhre-Poulsen P. Neural inhibition during maximal voluntary eccentric and concentric contraction: Effects of resistance training. *J Appl Physiol*, 2000; (89) 2249-2257.
- Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson P, and Dyhre-Poulsen P. Neural adaptation to resistance training: changes in evoked V-wave and H-reflex responses. *J Appl Physiol*, 2002; 92: 2309–2318.
- Aagaard P. Training-induced changes in neural function. *Exerc Sport Sci Rev*, 2003; 31(2), 61-67.
- Abbott BC, Bigland B, Ritchie JM. The physiological cost of negative work. *J Physiol*, 1952; 117 (3): 380-390.
- Abbott BC, Bigland B. The effects of force and speed changes on the rate of oxygen consumption during negative work. *J Physiol*. 1953; 120: 319 – 325.
- Abernethy PJ, Jurimae J, Logan PA, Taylor AW, and Thayer RE. Acute and chronic response of skeletal muscle to resistance exercise. *Sports Med*, 1994; 17: 22–38,
- Aboodarda SJ, Yusof A, Abu Osman NA, Thompson MW, Mokhtar AH. Enhanced performance with elastic resistance during the eccentric phase of a countermovement jump. *Int J Sports Physiol Perform*, 2013; 8 (2): 181-187.
- Adamson M, Macquaide N, Helgerud J, Hoff J, Kemi OJ. Unilateral arm strength training improves contralateral peak force and rate of force development. *Eur J Appl Physiol*, 2008; 103 (5):553-9.
- Almeida GP, Carneiro KK, De Moraes HC, B, DOJ. Effects of unilateral dominance of the lower limbs on flexibility and isokinetic performance in healthy females. *Fisioter Mov*, 2012; 25(3), 551-559.

- Ando R, Nosaka K, Tomita A, Watanabe K, Blazevich AJ, Akima H. Vastus intermedius vs vastus lateralis fascicle behaviors during maximal concentric and eccentric contractions. *Scand J Med Sci Sports*, 2018; 28 (3): 1018-1026. doi:10.1111/sms.13022.
- Arabatzi F, Kellis E Olympic weightlifting training causes different knee muscle-coactivation adaptations compared with traditional weight training. *J Strength Cond Res*, 2012; 26 (8): 2192-2201. doi:10.1519/JSC.0b013e31823b087a
- Asmussen E. Positive and negative muscular work. *Acta Physiol Scand*, 1953; 28(4), 364-82.
- Avrillon S, Jidovtseff B, Hug F, Guilhem G. Influence of Isoinertial-Pneumatic Mixed Resistances on Force-Velocity Relationship. *Int J Sports Physiol Perform*, 2017; 12 (3): 385-392. doi:10.1123/ijsp.2016-0226

## B

- Babault N, Pousson M, Ballay Y, Van Hoecke J. Activation of human quadriceps femoris during isometric, concentric, and eccentric contractions. *J Appl Physiol*, 2001; 91(6), 2628-34.
- Baechle T, Earle RW. (2008): *Essentials of Strength Training and Conditioning*. Human Kinetics.
- Baechle TR, Earle, RW. (2007): *Principios del entrenamiento de la fuerza y Del acondicionamiento físico*. Panamericana. ISBN. 978-84-9835-007-4.
- Baldwin KM and Haddad F. Effects of different activity and inactivity paradigms on myosin heavy chain gene expression in striated muscle. *J Appl Physiol*, 2001; 90: 345-357,
- Barry DW, Kohrt WM. Exercise and the preservation of bone health. *J Cardiopulm Rehabil Prev*, 2008; 28(3), 153-162. <https://doi.org/10.1097/01.HCR.0000320065.50976.7c>
- Bartolomei S, Hoffman JR, Stout JR, Merni F. Effect of Lower-Body Resistance Training on Upper-Body Strength Adaptation in Trained Men. *J Strength Cond Res*, 2008; 32.

- Bartolomei S, Hoffman JR, Stout JR, Merni F. Effect of Lower-Body Resistance Training on Upper-Body Strength Adaptation in Trained Men. *J. Strength Cond. Res.* 2018, 32, 13–18.
- Behm DG, Sale DG. Velocity specificity of resistance training. *Sports Med*, 1993; 15(6), 374-388.
- Behm, DG, Anderson, K y Curnew, RS. Muscle force and activation under stable and unstable Conditions. *J Strength Cond Res*, 2002; (16)416-422.
- Behm DG, Muehlbauer T, Kibele A, Granacher U. Effects of strength Training using unstable surfaces on strength, power and balance performance across the lifespan: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med*, 2015; 45 (12): 1645-1669. Doi: 10.1007/s40279-015-0384-x
- Behm DG, Drinkwater EJ, Willardson JM, Cowley PM. The use of instability to train the core musculature. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2010; (35) 91-108.
- Behringer M, Vom Heede A, Matthews M, Mester J. Effects of Strength Training on Motor Performance Skills in Children and adolescents: A Meta-Analysis. *Pediatr. Exerc. Sci.* 2011, 23, 186–206.
- Beltman JG, Sargeant AJ, van Mechelen W, de Haan A Voluntary activation level and muscle fiber recruitment of human quadriceps during lengthening contractions. *J Appl Physiol* (1985), 2004a; 97 (2): 619-626. doi:10.1152/jappphysiol.01202.2003
- Beltman JG, Van Der Vliet MR, Sargeant AJ, De Haan A. Metabolic cost of lengthening, isometric and shortening contractions in maximally stimulated rat skeletal muscle. *Acta Physiol Scand*, 2004b; 182(2), 179-87.
- Bemben MG, Murphy RE. Age related neural adaptation following short term resistance training in women. *J Sports Med Phys Fitness*, 2001; 41(3):291-9.
- Ben Othman A, Behm DG, Chaouachi A. Evidence of Homologous and Heterologous Effects after Unilateral Leg Training in Youth. *Appl. Physiol. Nutr. Metab. Physiol. Appl. Nutr. Metab.* 2018, 43, 282–291.

- Berton R, Lixandrao ME, Pinto ESCM, Tricoli V. Effects of weightlifting exercise, traditional resistance and plyometric training on countermovement jump performance: a meta-analysis. *J Sports Sci*, 2018; 36 (18): 2038-2044. doi:10.1080/02640414.2018.1434746.
- Billeter R, Hoppler H. (1992): *Muscular basis of strength In: Strength and power in sport*. Edited by P. Komi, Blackwell Scientific Publication, London, 39-63.
- Blazeovich A J, Cannavan D, Coleman DR, Horne S. Influence of concentric and eccentric resistance training on architectural adaptation in human quadriceps muscles. *J Appl Physiol* (1985), 2007; 103(5), 1565-1575. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00578.2007>.
- Blazeovich A. (2017): *Sports Biomechanics. The Basics: Optimizing human performance*. Bloomsbury.
- Blazeovich AJ, Babault N. Post-activation Potentiation versus Post-activation Performance Enhancement in Humans: Historical Perspective, Underlying Mechanisms, and Current Issues. *Frontiers in Physiology*, 2019; 10, 1359. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.01359>.
- Bobbert MF, Gerritsen KGM, Litjens MCA, Van Soest, AJ. Why Is Countermovement Jump Height Greater than Squat Jump Height? *Med. Amp. Sci. Sports Amp. Exerc* 1996; 28, 1402–1412.
- Bompá TO, Buzzichelli, C A. (2019): *Teoría y metodología del entrenamiento*. Tutor. ISBN. 9788416676682.
- Bosco C. (1988): *Prologo en R. Mano. L'allenamento della forza*, Roma. Società Stampa Sportiva.
- Bosco c. (2000): *La fuerza muscular Aspectos metodológicos*. Barcelona: Inde.
- Boyle M. (2016): *New functional training for sports*. Human Kinetics.
- Brandenburg JP, Docherty D. The effects of accentuated eccentric loading on strength, muscle hypertrophy, and neural adaptations in trained individuals. *J Strength Cond Res*, 2002; 16 (1): 25-32.

- Brooks G. A, Thomas DF, Kenneth M B. (2004): *Exercise Physiology. Human Bioenergetics and Its Applications*, New York, McGraw Hill.
- Brown, Lee E. (2017): *Strength training / National Strength and Conditioning Association*. Human Kinetics. ISBN: 978-1-4925-2208-9.
- Brown, Lee E. (2018): *Entrenamiento de la fuerza*. Tutor.
- Bubbico A, Kravitz L. Eccentric Exercise: A comprehensive review of a distinctive training method. *IDEA Fitness Journal*, 2010; 7(9), 50-59.

## C

- Carr LJ, Harrison LM, Stephens JA. Evidence for bilateral innervation of certain homologous motoneurone pools in man. *J Physiol*, 1994; 475: 217–227.
- Carroll TJ, Herbert RD, Munn J, Lee M, Gandevia SC. Contralateral Effects of Unilateral Strength Training: Evidence and Possible Mechanisms. *J. Appl. Physiol*, 2006; 101, 1514–1522.
- Carroll KM, Wagle JP, Sato K, Taber CB, Yoshida N, Bingham GE, Stone MH. Characterizing overload in inertial flywheel devices for use in exercise training. *Sports Biomech*, 2018; 1-12. doi:10.1080/14763141.2018.1433715
- Carroll TJ, Riek S, and Carson RG. The sites of neural adaptation induced by resistance training in humans. *J Physiol*, 2002; 544: 641–652
- Carson RG, Riek S, Mackey DC, Meichenbaum DP, Willms K, Forner M, and Byblow WD. Excitability changes in human forearm corticospinal projections and spinal reflex pathways during rhythmic voluntary movement of the opposite limb. *J Physiol*, 2004; 560: 929–940.
- Caruso JF, Hernandez DA, Saito K, Cho M, Nelson NM. Inclusion of eccentric actions on net caloric cost resulting from isoinertial resistance exercise. *J Strength Cond Res*, 2003; 17 (3): 549 - 555.
- Channell BT, Barfield JP. Effect of Olympic and traditional resistance training on vertical jump improvement in high school boys. *J Strength Cond Res*, 2008; 22 (5): 1522-1527. doi:10.1519/JSC.0b013e318181a3do

- Chapman D, Newton M, Sacco P, Nosaka K. Greater muscle damage induced by fast versus slow velocity eccentric exercise. *Int J Sports Med*, 2006; 27 (8): 591-598. doi:10.1055/s-2005-865920
- Chen TC, Huang MJ, Lima LCR, Chou TY, Wang HH, Tu JH, Lin SC, Nosaka K. Changes in Insulin Sensitivity and Lipid Profile Markers Following Initial and Secondary Bouts of Multiple Eccentric Exercises. *Front Physiol*, 2022; 6; 13:917317. doi: 10.3389/fphys.2022.917317. PMID: 35733998; PMCID: PMC9207458.
- Cirer-Sastre R, Beltran-Garrido JV, Corbi F. Contralateral Effects after unilateral Strength Training: A Meta-Analysis Comparing Training Loads. *J. Sports Sci. Med*, 2017; 16, 180–186.
- Coratella G, Milanese C, Schena F. Unilateral Eccentric Resistance Training: A Direct Comparison between Isokinetic and Dynamic Constant External Resistance Modalities. *Eur. J. Sport Sci*, 2015; 15, 720–726.
- Coratella G, Schena F. Eccentric resistance training increases and retains maximal strength, muscle endurance, and hypertrophy in trained men. *Appl Physiol Nutr Metab*, 2016; 41 (11): 1184-1189. Doi: 10.1139/apnm-2016-0321
- Colliander EB, Tesch PA. Effects of eccentric and concentric muscle actions in resistance training. *Acta Physiol Scand*, 1990; 140 (1): 31 – 39
- Cometti G. (2007): *Los Métodos Modernos De Musculación*. (4ed). Editorial Paidotribo.
- Corbin CB, Welk GJ, Corbin WR, Welk KA. (2008): *Concepts of physical fitness: active lifestyles for wellness*, 14<sup>th</sup> ed.: McGraw-Hill.
- Cormie P, McBride JM, McCaulley GO. Power-time, force-time, and velocity-time curve analysis during the jump squat: impact of load. *J Appl Biomech*, 2008; 24 (2): 112-120
- Cormie P, McCaulley GO, McBride JM. Power versus strength-power jump squat training: influence on the load-power relationship. *Med Sci Sports Exerc*, 2007; 39 (6): 996-1003. doi:10.1097/mss.ob013e3180408e0c

- Cormie P, McGuigan MR, Newton RU. Changes in the eccentric phase contribute to improved stretch-shorten cycle performance after training. *Med Sci Sports Exerc*, 2010; 42 (9): 1731-1744. doi:10.1249/MSS.0b013e3181d392e8.

#### D

- Davis WW. Cross-Education. *Science*, 1899; 10(366): 20–21. DOI: 10.1126/science.10.236.20

- Demura S, Yamaji S, Goshi F, Nagaswawa Y. Lateral dominance of legs in maximal muscle power, muscular endurance, and grading ability. / Dominance laterale des jambes dans un exercice d ' endurance et de force musculaire et capacite a mesurer sa propre force. *Percept Mot Skills*, 2001; 93(1), 11-23.

- de Souza-Teixeira F, de Paz JA. Eccentric Resistance Training and Muscle Hypertrophy. *J Sport Medic Doping Studie S*, 2012; S1.

- Dias CP, Toscan R, de Camargo M, Pereira EP, Griebler N, Baroni BM, Tiggemann CL. Effects of eccentric-focused and conventional resistance training on strength and functional capacity of older adults. *Age (Dordr)*, 2015; 37 (5): 99. Doi: 10.1007/s11357-015-9838-1

- Doss W, Karpovich P. A comparison of concentric, eccentric and isometric strength of the elbow flexors. *J Appl Physiol*, 1965; 20: 351-353.

- Douglas J, Pearson S, Ross A, McGuigan M. Chronic adaptations to eccentric training: a systematic review. *Sports Med*, 2017a; 47 (5): 917-941. Doi: 10.1007/s40279-016-0628-4

- Douglas J, Pearson S, Ross A, McGuigan M. Eccentric Exercise. Physiological Characteristics and Acute Responses. *Sports Med*, 2017b; 47(4):663-675. Doi: 10.1007/s40279-016-0624-8. PMID: 27638040.

- Douglas J, Pearson S, Ross A, McGuigan M. Effects of accentuated eccentric loading on muscle properties, strength, power, and speed in resistance-trained rugby players. *J Strength Cond Res*, 2018; 32 (10): 2750-2761. doi:10.1519/JSC.0000000000002772

- Dragert K, Zehr EP. Bilateral neuromuscular plasticity from unilateral training of the ankle dorsiflexors. *Experimental Brain Research*, 2011; (208) 217-227.
- Dwyer GB, Davis SE. (2008): *ACSM's health-related physical fitness assessment manual. 2 nd Ed*: Lippincott Williams & Wilkins. ISBN-13:978-0-7817-7549-6.
- Duchateau J, Semmler JG, Enoka RM. Training adaptations in the behavior of human motor units. *J Appl Physiol* (1985), 2006; 101(6), 1766-1775. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.00543.2006>
- Duchateau J, Enoka RM. Neural control of shortening and lengthening contractions: influence of task constraints. *J Physiol*, 2008; 586 (24): 5853-5864. doi:10.1113/jphysiol.2008.160747
- . Duchateau J, Baudry S. Insights into the neural control of eccentric contractions. *J Appl Physiol*, 2014; Jun 1; 116(11):1418-25. doi: 10.1152/jappphysiol.00002.2013. Epub 2013 Feb 21. PMID: 23429873.
- Duchateau, J.; Enoka, R.M. Neural Control of Lengthening Contractions. *J. Exp. Biol*, 2016; 219, 197–204.
- Dudley GA, Tesch PA, Miller BJ, Buchanan P. Importance of eccentric actions in performance adaptations to resistance training. *Aviat Space Environ Med*, 1991; 62(2), 543-50.

## E

- Ehlers BC, Silveira PR. Déficit bilateral: origem, mecanismos e implicações para o treino de força. / Bilateral deficit: origins, mechanisms, and implications for strength training. *Braz J Kineanthropom Human Performance*, 2012; 14(6), 749-761.
- Elmer S, Hahn S, McAllister P, Leong C, Martin J. Improvements in multi- joint leg function following chronic eccentric exercise. *Scand J Med Sci Sports*, 2012; 22 (5): 653-661. doi:10.1111/j.1600-0838.2011.01291.x
- English KL, Loehr JA, Lee SM, Smith SM. Early-phase musculoskeletal adaptations to different levels of eccentric resistance

after 8 weeks of lower body training. *Eur J Appl Physiol*, 2014; 114 (11): 2263-2280. Doi: 10.1007/s00421-014-2951-5

- Enoka RM. Eccentric Contractions Require Unique Activation Strategies by the Nervous System. *J. Appl. Physiol*, 1996; 81, 2339–2346.

- Enoka RM. (2002): *Neuromechanics of human movement*. (3rd Ed.) Champaign IL: Human Kinetics.

- Escamilla RF, Zheng N, Imamura R, Macleod TD, Edwards WB, Hreljac A, Fleisig GS, Wilk KE, Moorman CT 3<sup>a</sup>, Andrews JR. Cruciate ligament force during the wall squat and the one-leg squat. *Med Sci Sports Exerc*, 2009; (41) 408-417.

- Evetovich TK, Housh TJ, Housh DJ, Johnson GO, Smith DB, Ebersole KT. The Effect of Concentric Isokinetic Strength Training of the Quadriceps Femoris on Electromyography and Muscle Strength in the Trained and Untrained Limb. *J Strength Cond. Res* 2001; 15, 439–445.

## F

- Fang Y, Siemionow V, Sahgal V, Xiong F, Yue GH. Greater movement-related cortical potential during human eccentric versus concentric muscle contractions. *J Neurophysiol*, 2001; 86 (4): 1764-1772.

- Fang Y, Siemionow V, Sahgal V, Xiong F, Yue GH. Distinct brain activation patterns for human maximal voluntary eccentric and concentric muscle actions. *Brain Res*, 2004; 1023 (2): 200-212.

doi:10.1016/j.brainres.2004.07.035

- Farina D, Merletti R, and Enoka RM. The extraction of neural strategies from the surface EMG. *J Appl Physiol*, 2004; 96: 1486–1495,

- Farthing JP. Cross-Education of Strength Depends on Limb Dominance: Implications for Theory and Application. *Exerc Sport Sci Rev*, 2009; 37(4), 179-187.

- Farthing JP, Borowsky R, Chilibeck PD, Binsted G, Sarty GE. Neuro-Physiological Adaptations Associated with Cross- Education of Strength. *Brain Topogr*, 2007; 20, 77–88.

- Farthing JP, Chilibeck PD. The Effect of Eccentric Training at Different Velocities on Cross-Education. *Eur. J. Appl. Physiol*, 2003; 89, 570–577.
- Farthing JP, Chilibeck PD, Binsted G. Cross-education of arm muscular strength is unidirectional in right-handed individuals. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2005; (37) 1594-1600
- Farthing JP, Krentz JR, Magnus CR, Barss TS, Lanovaz JL, Cummine J, Esopenko C, Sarty GE, Borowsky R. Changes in functional magnetic resonance imaging cortical activation with cross education to an immobilized limb. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 2011; 43, 1394-1405.
- Farthing JP, Zehr EP. Restoring Symmetry: Clinical Applications of Cross-Education. *Exerc. Sport Sci. Rev*, 2014; 42, 70–75.
- Farup J, Rahbek SK, Vendelbo MH, Matzon A, Hindhede J, Bejder A, Ringgard S, Vissing K. Whey protein hydrolysate augments tendon and muscle hypertrophy independent of resistance exercise contraction mode. *Scand J Med Sci Sports*, 2014; 24 (5): 788-798. doi:10.1111/sms.12083.
- Faulkner JA. Terminology for contractions of muscles during shortening, while isometric, and during lengthening. *J Appl Physiol*, 2003; 95(2):455-9.
- Faulkner JA, Larkin LM, Claflin DR, Brooks SV. Age-Related changes in the structure and function of skeletal muscles. *Clin Exp Pharmacol Physiol*, 2007; 34 (11):1091-6. Doi: 10.1111/j.1440-1681.2007.04752.x. PMID: 17880359
- Fauth ML, Garceau LR, Wurm BJ, Ebben WP. Eccentric Muscle Actions Produce 36% to 154% Less Activation than Concentric Muscle Actions. *International Symposium on Biomechanics in Sports: Conference Proceedings Archive*, 2010; 28, 1-4.
- Fernandez-Gonzalo R, Bresciani G, de Souza-Teixeira F, Hernandez-Murua JA, Jimenez-Jimenez R, González-Gallego J, de Paz JA. Effects of a 4-week eccentric training program on the repeated bout effect in young active women. *J Sports Sci Med*, 2011; 10 (4): 692-699.
- Fernandez-Gonzalo R, Lundberg TR, Alvarez-Alvarez L, de Paz JA. Muscle damage responses and adaptations to eccentric-overload resistance exercise

in men and women. *Eur J Appl Physiol*, 2014<sup>a</sup>; 114 (5): 1075- 1084. Doi: 10.1007/s00421-014-2836-7

- Fimland MS, Helgerud J, Solstad GM, Iversen VM, Leivseth G, Hoff J. Neural adaptations underlying cross-education after unilateral strength training. *Eur J Appl Physiol*, 2009; 107(6):723-30
- Folland JP, Williams AG. The adaptations to strength training : morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Med*, 2007; 37(2):145-68.
- Fleck SJ, Kraemer WJ. (1997): *Designing resistance training program*. (2nd Ed). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Franchi MV, Atherton PJ, Reeves ND, Fluck M, Williams J, Mitchell WK, Selby A, Beltran Valls RM, Narici MV. Architectural, Functional and Molecular Responses to Concentric and Eccentric Loading in Human Skeletal Muscle. *Acta Physiol*, 2014; 210, 642–654.
- Franchi MV, Reeves ND, Narici MV. Skeletal Muscle Remodeling in Response to Eccentric vs. Concentric Loading: Morphological, Molecular, and Metabolic Adaptations. *Front Physiol*, 2017; 8: 447.doi:10.3389/fphys.2017.00447
- Friedmann-Bette B, Bauer T, Kinscherf R, Vorwald S, Klute K, Bischoff D, Muller H, Weber MA, Metz J, Kauczor HU; et al. Effects of Strength Training with Eccentric Overload on Muscle Adaptation in Male Athletes. *Eur. J. Appl. Physiol*, 2010; 108, 821–836.
- Friedmann B, Kinscherf R, Vorwald S, Muller H, Kucera K, Borisch S, Richter G, Bartsch P, Billeter R. Muscular Adaptations to Computer-Guided Strength Training with Eccentric Overload. *Acta Physiol. Scand*, 2004; 182, 77–88.
- Frost DM, Cronin J, Newton RU. A biomechanical evaluation of resistance: fundamental concepts for training and sports performance. *Sports Med*, 2010; 40 (4): 303-326. Doi: 10 .2165/11319420-000000000-00000
- Fry AC. The role of resistance exercise intensity on muscle fibre adaptations. *Sports Med*, 2004; 34(10), 663-679.

## G

- Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev*, 2001; 81(4):1725-89.
- Garcia-Lopez D. Efectos del entrenamiento excéntrico sobre el daño muscular, el estrés oxidativo y la activación del factor de transcripción nuclear Kappa-B inducidos por un ejercicio excéntrico agudo. (2006). Universidad de León.
- Garcia-Lopez D, Cuevas MJ, Almar M, Lima E, De Paz JA, González-Gallego J Effects of eccentric exercise on NF-kappaB activation in blood mononuclear cells. *Med Sci Sports Exerc*, 2007; 39 (4): 653-664. doi:10.1249/mss.ob013e31802f04f6
- Garcia-Lopez D. (2008): *El Entrenamiento Excéntrico. Fundamentos y aplicaciones con población general y deportista*. En A. Jiménez Gutiérrez (Ed.), *Nuevas dimensiones en el entrenamiento de fuerza: Aplicación de nuevos métodos, recursos y tecnologías*. (pp. 75-102). INDE.
- Garcia-Lopez D, Hernandez-Sanchez S, Martin E, Marin PJ, Zarzosa F, Herrero AJ Free-weight augmentation with elastic bands improves bench-press kinematics in professional rugby players. *J Strength Cond Res*, 2014; doi:10.1519/JSC.0000000000000374
- Garcia Manso J M, Navarro M, Ruiz J A. (1996): *Pruebas para la valoración de la capacidad motriz en el deport*. Madrid. Editorial: Gymnos.
- Gerber JP, Marcus RL, Dibble L, Greis, PE, LaStayo, PC. Early application of negative work via eccentric ergometry following anterior cruciate ligament reconstruction: a case report. *J Orthop Sports Phys Ther*, 2006; 36 (5): 298 - 307.
- Gillies EM, Putman CT, Bell GJ. The effect of varying the time of concentric and eccentric muscle actions during resistance training on skeletal muscle adaptations in women. *Eur J Appl Physiol*, 2006, 97 (4): 443-453. Doi: 10.1007/s00421-006-0192-y

- Goldspink G. (1992): *Strength and power in sport*. London. Editorial: Blackwell scientific Publication.
- González-Badillo JJ, Gorostiaga E. (2002): *Metodología del entrenamiento para el desarrollo de la fuerza (3ª ed.)*. Madrid: Centro Olímpico de Estudios Superiores (C.O.E.S).
- González-Badillo JJ, Gorostiaga E (2002): *Fundamentos del entrenamiento de la fuerza. Aplicación al alto rendimiento deportivo. Vol 3rd Edition*. INDE, Zaragoza, Spain
- González-Hernández JM, García-Ramos A, Colomer-Poveda, D, Tvarijonaviciute A, Cerón J, Jiménez-Reyes P, Márquez G. Resistance Training to Failure vs. Not to Failure: Acute and Delayed Markers of Mechanical, Neuromuscular, and Biochemical Fatigue. *Journal of Strength and Conditioning Research*, 2021; 35(4), 886-893. <https://doi.org/10.1519/JSC.0000000000003921>
- González-Rave JM, Pablos-Avella C, Navarro-Valdivielso. (2014): *Entrenamiento deportivo. Teoría y prácticas*. Médica Panamericana.
- González-Badillo JJ, Ribas J. (2002): *Bases de la programación del entrenamiento de fuerza*. Barcelona: INDE.
- González-Badillo JJ, Sanchez-Medina L. Movement velocity as a measure of loading intensity in resistance training. *Int J Sports Med*, 2010; 31 (5): 347-352.
- González Badillo, JJ, Sánchez-Medina L, Pareja-Blanco F, Rodríguez Rosell D. (2017): *La velocidad de ejecución como referencia para la programación, control y evaluación del entrenamiento de fuerza*. Ergotech,
- Gonzalez JT, Barwood MJ, Goodall S, Thomas K, Howatson G. Alterations in Whole-Body Insulin Sensitivity Resulting From Repeated Eccentric Exercise of a Single Muscle Group: A Pilot Investigation. *Int J Sport Nutr Exerc Metab*, 2015 Aug; 25(4):405-10. Doi: 10.1123/ijsnem.2014-0211. Epub 2015 Feb 12. PMID: 25675160.
- Green H, Goreham C, Ouyang J, Ball-Burnett M, Ranne D. Regulation of fiber size, oxidative potential, and capillarization in human muscle by

resistance exercise. *Am J Physiol*, 1999; 276(2), R591-6  
<https://doi.org/10.1152/ajpregu.1999.276.2.R591>

- Green LA, Gabriele DA. The Effect of Unilateral Training on Contralateral Limb Strength in Young, Older, and Patient Populations: A Meta-Analysis of Cross Education. *Phys. Ther. Rev*, 2018; 23, 238–249.
- Grgic J, Schoenfeld BJ, Orazem J, Sabol F. Effects of resistance training performed to repetition failure or non-failure on muscular strength and hypertrophy: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Sport and Health Science*, 2021; S2095-2546(21)00007-7. <https://doi.org/10.1016/j.jshs.2021.01.007>
- Gross M, Luthy F, Kroell J, Müller E, Hoppeler H, Vogt M. Effects of eccentric cycle ergometry in alpine skiers. *Int J Sports Med*, 2010; 31 (8): 572-576. Doi: 10.1055/s-0030-1254082
- Grosser M, Müller H. (1992). *Desarrollo muscular*. Barcelona, Hispano Europea
- Gruber M, Linnamo V, Strojnik V, Rantalainen T, Avela J. Excitability at the Motoneuron Pool and Motor Cortex Is Specifically Modulated in Lengthening Compared to Isometric Contractions. *J. Neurophysiol*, 2009; 101, 2030–2040.
- Guezennec Y, Leger L, Lhoste F, Aymonod M, Pesquies, PC. Hormone and metabolite response to weight-lifting training sessions. *Int J Sports Med*, 1986; 7(2), 100-105. <https://doi.org/10.1055/s-2008-1025742>
- Guilhem G, Cornu C, Guevel A. Neuromuscular and muscle-tendon system adaptations to isotonic and isokinetic eccentric exercise. *Ann Phys Rehabil Med*, 2010; 53 (5): 319-341. doi:10.1016/j.rehab.2010.04.003
- Guilhem G, Cornu C, Guevel A. A methodologic approach for normalizing angular work and velocity during isotonic and isokinetic eccentric training. *J Athl Train*, 2012; 47 (2): 125-129.
- Guilhem G, Cornu C, Maffiuletti NA, Guevel A. Neuromuscular adaptations to isoload versus isokinetic eccentric resistance training. *Med Sci Sports Exerc*, 2013; 45 (2): 326-335. doi:10.1249/MSS.0b013e31826e7066

## H

- Haaland KY, Harrington DL, Knight RT. Neural representations of skilled movement. *Brain*, 2000; 123: 2306–2313
- Haaland KY, Elsinger CL, Mayer AR, Durgerian S, Rao SM. Motor sequence complexity and performing hand produce differential patterns of hemispheric lateralization. *J Cogn Neurosci*, 2004; 16: 621–636
- Hackett D, Davies T, Soomro N, Halaki M (2016). Olympic weightlifting training improves vertical jump height in sportspeople: a systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med*, 50 (14): 865-872. Doi: 10.1136/bjsports-2015-094951
- Haff, G. G., Triplett, N. T., & National Strength & Conditioning Association. (2018): *Principios del entrenamiento de la fuerza y Del acondicionamiento físico*. Human Kinetics, Champaign, Illinois (EUA). Editorial Paidotribo. ISBN: 978-84-9910-663-2
- Hakkinen K, Komi PV, Alen M. Effect of explosive type strength training on isometric force- and relaxation-time, electromyographic and muscle fibre characteristics of leg extensor muscles. *Acta Physiol Scand*, 1985a; 125 (4): 587-600. doi:10.1111/j.1748-1716.1985.tb07759.x
- Hakkinen K, Pakarinen A, Alen M, Komi PV. Serum hormones during prolonged training of neuromuscular performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1985b; 53 (4): 287-293.
- Hanajima R, Ugawa Y, Machii K, Mochizuki H, Terao Y, Enomoto H, Furubayashi T, Shiio Y, Uesugi H, and Kanazawa I. Interhemispheric facilitation of the hand motor area in humans. *J Physiol*, 2001; 531: 849–859.
- Hansen S, Kvorning T, Kjaer M, Sjøgaard G. The Effect of Short-Term Strength Training on Human Skeletal Muscle: The Importance of Physiologically Elevated Hormone Levels. *Scand. J. Med. Sci. Sports*; 2001; 11, 347–354.
- Harman E. Strength and Power: a definition of terms. *J Strength Cond Res*, 1993; 15(6), 18-20.

- Haskell WL, Lee IM, Pate RR, Powell KE, Blair SN, Franklin BA, Macera CA, Heath GW, Thompson PD, Bauman A. Physical activity and public health: updated recommendation for adults from the American College of Sports Medicine and the American Heart Association. *Med Sci Sports Exerc*, 2007; 39(8), 1423-34.
- Hather BM, Tesch PA, Buchanan P, Dudley GA. Influence of eccentric actions on skeletal muscle adaptations to resistance training. *Acta Physiol Scand*, 1991; 143 (2): 177-185. doi:10.1111/j.1748-1716.1991.tb09219.x
- Hendy AM, Lamon S. The Cross-Education Phenomenon: Brain and Beyond. *Front. Physiol*, 2017; 8, 297.
- Hedges LV. Distribution Theory for Glass's Estimator of Effect Size and Related Estimators. *J. Educ. Stat*, 1981; 6, 107.
- Hendy AM, Spittle M, Kidgell DJ. Cross education and immobilization: mechanisms and implications for injury rehabilitation. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 2012; (15) 94-10.
- Heredia Elvar JR, Garcia-orea GP. (2019): *Entrenamiento de la fuerza para la mejora de la condición física y de la salud*. Círculo rojo. ISBN: 978-1-4504-4482-8
- Hibbs AE, Thompson KG, French D, Wrigley A, Spears I. Optimizing performance by improving core stability and core strength. *Sports Med*, 2008; 38(12):995-1008. Doi: 10.2165/00007256-200838120-00004. PMID: 19026017.
- Hicks AL, Kent-Braun J, Ditor DS. Sex differences in human skeletal muscle fatigue. *Exerc Sport Sci Rev*, 2001; 29 (3), 109-112.
- Hill AV. Mechanics of the contractile element of muscle. *Nature*. 1950; 166(4219):415-9.
- Hoffman JR, Cooper J, Wendell M, Kang J. Comparison of Olympic vs. traditional power lifting training programs in football players. *J Strength Cond Res*, 2004; 18 (1): 129-135.

- Hollander DB, Kraemer RR, Kilpatrick MW, Ramadan ZG, Reeves GV, Francois M, Hebert EP, Tryniecki JL. Maximal eccentric and concentric strength discrepancies between young men and women for dynamic resistance exercise. *J Strength Cond Res*, 2007; 21 (1): 34-40. doi:10.1519/R-18725.1
- Hopkins WG. A Scale of Magnitudes for Effect Statistics. Available online: <http://sportsci.org/resource/stats/effectmag.html> (accessed on 20 March 2021)
- Hopkins WG, Marshall SW, Batterham AM, Hanin J. Progressive Statistics for Studies in Sports Medicine and Exercise Science. *Med. Sci. Sports Exerc*, 2009; 41, 3-13.
- Hortobagyi T, Barrier J, Beard D, Braspennincx J, Koens P, Devita P, Dempsey L & Lambert J. Greater initial adaptations to submaximal muscle lengthening than maximal shortening. *Journal of Applied Physiology*, 1996; (81) 1677-1682.
- Hortobagyi T. Cross education and the human central nervous system. *IEEE Eng Med Biol Mag*, 2005; 24: 22-28
- Hortobagyi T, Devita P, Money J, Barrier J. Effects of standard and eccentric overload strength training in young women. *Med Sci Sports Exerc*, 2001; 33 (7): 1206-1212.
- Hortobágyi T, Dempsey L, Fraser D, Zheng D, Hamilton G, Lambert J, Dohm L. Changes in muscle strength, muscle fibre size and Myofibrillar gene expression after immobilization and retraining in humans. *J Physiol*, 2000; 524 Pt 1:293-304.
- Hortobagyi T, Lambert NJ, Hill JP. Greater cross education following training with muscle lengthening than shortening. *Med Sci Sports Exerc*, 1997; 29(1):107-12.
- Hortobagyi T, Scott K, Lambert J, Hamilton G, and Tracy J. Cross-education of muscle strength is greater with stimulated than voluntary contractions. *Motor Control*, 1999; 3: 205-219.

- Hortobágyi T, Taylor JL, Petersen NT, Russell G, and Gandevia SC. Changes in segmental and motor cortical output with contralateral muscle contractions and altered sensory inputs in humans. *J Neurophysiol*, 2003; 90: 2451–2459.
  - Hortobágyi, T.; Scott, K.; Lambert, J.; Hamilton, G.; Tracy, J. Cross-Education of Muscle Strength Is Greater with Stimulated than Voluntary Contractions. *Motor Control*, 1999; 3, 205–219.
  - Howatson G, Taylor MB, Rider P, Motawar BR, McNally MP, Solnik S, Hortobágyi T. Ipsilateral motor cortical responses to TMS during lengthening and shortening of the contralateral wrist flexors. *Eur J Neurosci*, 2011; 33(5) 978-990
  - Huxley HE. Fifty years of muscle and the sliding filament hypothesis. *Eur J Biochem*. 2004; 271 (8): 1403 - 1415.
- I
- Immisch I, Quintern J, and Straube A. Unilateral cerebellar lesions influence arm movements bilaterally. *Neuroreport*, 2003; 14: 837– 840,.
  - IntHout J, Ioannidis J, PA, Rovers MM, Goeman JJ. Plea for Routinely Presenting Prediction Intervals in Meta-Analysis. *BMJ Open*, 2016; 6, e010247.
  - Isner-Horobeti ME, Dufour SP, Vautravers P, Geny B, Coudeyre E, Richard R. Eccentric exercise training: modalities, applications and perspectives. *Sports Med*, 2013; 43 (6): 483-512. Doi: 10.1007/s40279-013- 0052-y
  - Izquierdo M. (2008): *Biomecánica y bases neuromusculares de la actividad física y el deporte*. Madrid. Editorial Médica Panamericana.
  - Iwamura Y, Taoka M, and Iriki A. Bilateral activity and callosal connections in the somatosensory cortex. *Neuroscientist*, 2001; 7: 419– 429,

**J**

- Jakobi, JM y Chilibeck, PD. Bilateral and unilateral contractions: Possible differences in maximal voluntary force. *Can J Appl Physiol*, 2001; 26:12-33,
- Jensen JL, Marstrand PC, and Nielsen JB. Motor skill training and strength training are associated with different plastic changes in the central nervous system. *J Appl Physiol*, 2005; 99: 1558–1568
- Jiménez GA. (2003): *Fuerza y Salud, la aptitud Músculo-esquelética, el entrenamiento de la fuerza y la salud*. Barcelona: Ergo.
- Jiménez-Jiménez R, Cuevas MJ, Almar M, Lima E, Garcia-Lopez D, De Paz JA, González-Gallego J. Eccentric training impairs NF-kappaB activation and over-expression of inflammation-related genes induced by acute eccentric exercise in the elderly. *Mech Ageing Dev*, 2008; 129 (6): 313-321. doi:10.1016/j.mad.2008.02.007
- Jiménez-Reyes P, Samozino P, Brughelli M, Morin JB. Effectiveness of an individualized training based on force-velocity profiling during jumping. *Front Physiol*, 2016; 7 677. doi:10.3389/fphys.2016.00677
- Jones EJ, Bishop PA, Woods AK, Green JM. Cross-Sectional Area and Muscular Strength: A Brief Review. *Sports Medicine*, 2008; 38(12), 987-994.
- Joyce D, Lewindon D. (2014): *High-performance training for Sports*. Human Kinetics. ISBN-13: 978-1-4504-4482-8

**K**

- Kannus P, Alosa D, Cook L, Johnson RJ, Renstrom P, Pope M, Beynnon B, Yasuda K, Nichols C, and Kaplan M. Effect of one-legged exercise on the strength, power and endurance of the contralateral leg. A randomized, controlled study using isometric and concentric isokinetic training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 64: 117–126, 1992.
- Kawashima R, Yamada K, Kinomura S, Yamaguchi T, Matsui H, Yoshioka S, and Fukuda H. Regional cerebral blood flow changes of cortical

motor areas and prefrontal areas in humans related to ipsilateral and contralateral hand movement. *Brain Res* 623: 33–40, 1993.

- Kidgell, D.J.; Frazer, A.K.; Daly, R.M.; Rantalainen, T.; Ruotsalainen, I.; Ahtiainen, J.; Avela, J.; Howatson, G. Increased Cross- Education of Muscle Strength and Reduced Corticospinal Inhibition Following Eccentric Strength Training. *Neuroscience* **2015**, 300, 566–575
- Kleim JA, Hogg TM, VandenBerg PM, Cooper NR, Bruneau R, and Remple M. Cortical synaptogenesis and motor map reorganization occur during late, but not early, phase of motor skill learning. *J Neurosci* 24: 628–633, 2004.
- Knuttgen HG, Komi PV. Basic considerations for exercise. In: Komi PV, editor. *Strength and power in sport*. Oxford: Blackwell scientific publications, 2003; 3 -7.
- Knuttgen, H. G., Kraemer, W. J. (1987). Terminology and measurement in exercise performance. *J. of Appl. Sports Sci. Res.* 1: 1-10.
- Kobayashi, Y, Kubo, J, Matsuo, A, Matsubayashi, T, Kobayashi, K y Ishii, N. Bilateral asymmetry in joint torque during squat exercise performed by long jumpers. *J Strength Cond Res* 24:2826 -2830, 2010
- Komi PV (1986). Training of muscle strength and power: interaction of neuromotoric, hypertrophic and mechanical factors. *Int J Sports Med*, 7 (1): 10-15.
- Komi, P. V. & Buskirk, E. R. Effect of eccentric and concentric muscle conditioning on tension and electrical activity of human muscle. *Ergonomics*, 1972; 15(4), 417-34.
- Komi, P. V., Kaneko, M. & Aura, O. EMG activity of the leg extensor muscles with special reference to mechanical efficiency in concentric and eccentric exercise. *Int J Sports Med*, 1987; 8 Suppl 1, 22-9.
- Komi PV, Viitasalo JT, Rauramaa R, Vihko V. Effect of isometric strength training of mechanical, electrical, and metabolic aspects of muscle function. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*.1978; 40(1):45-55.

- Kraemer, W. J., Adams, K., Cafarelli, E., Dudley, G. A., Dooly, C., Feigenbaum, M. S., et al. (2002). American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc*, 34(2), 364-380.
- . Kraemer WJ, Häkkinen K, Newton RU, Nindl BC, Volek JS, McCormick M, Gotshalk LA, Gordon SE, Fleck SJ, Campbell W, Putukian M, Evans WJ. Effects of heavy-resistance training on hormonal response patterns in younger vs. older men. *J Appl Physiol*. 1999; 87(3): 982 – 992
- Kraemer, W. J., Ratamess, N. A., Flanagan, S. D., Shurley, J. P., Todd, J. S., & Todd, T. C. (2017a). Understanding the science of resistance training: an evolutionary perspective. *Sports Med*, 47(12), 2415-2435. <https://doi.org/10.1007/s40279-017-0779-y>
- Kraemer, W. J., & Ratamess, N. A. (2004). Fundamentals of Resistance Training: Progression and Exercise Prescription. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 36(4), 674–688
- Kraemer WJ and Ratamess NA. Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports Med* 35: 339–361, 2005.
- Kraemer WJ, Vingren JL. (2007). Muscle Anatomy. In: Brown LE, editor. *Strength Training*. Champaign: Human Kinetics; 3 – 28
- Krzykała, M. Dual Energy X-Ray Absorptiometry in Morphological Asymmetry Assessment among Field Hockey Players. *Journal of Human Kinetic*, 2010; 25, 5-136
- Krzykała, M. 2012. Dxa as a Tool for the Assessment of Morphological Asymmetry in Athletes, Dual Energy X-Ray Absorptiometry. In: MAGHRAOUI, A. E. (ed.) *Dual Energy X-Ray Absorptiometry*.
- Kulig K, Powers CM, Shellock FG, Terk M (2001). The effects of eccentric velocity on activation of elbow flexors: evaluation by magnetic resonance imaging. *Med Sci Sports Exerc*, 33 (2): 196-200

## L

- Lagerquist O, Zehr EP, Docherty D. Increased spinal reflex excitability is not associated with neural plasticity underlying the cross-education effect. *J Appl Physiol*, 2006; 100: 83–90,
- Lake J, Lauder M, Smith N, Shorter K. A comparison of ballistic and nonballistic lower-body resistance exercise and the methods used to identify their positive lifting phases. *J Appl Biomech*, 2012; 28 (4): 431-437.
- Lanshammar K, Ribom EL. Differences in muscle strength in dominant and non-dominant leg in females aged 20-39 years—a population-based study. *Phys Ther Sport*, 2011; 12(2), 76-9.
- La Scala Teixeira CV, Evangelista AL, Novaes JS, Da Silva Grigoletto ME, Behm D. G. F. in P., 8, 643. “You’re only as strong as your weakest link”: A current opinion about the concepts and characteristics of functional training. *Frontiers in Physiology*, 2017; 8(643), Article 643. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00643>.
- LaStayo PC, Ewy GA, Pierotti D, Johns RK, Lindstedt S. The positive effects of negative work: increased muscle strength and decreased fall risk in a frail elderly population. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 2003; 58 (5): M419 - M424.
- Latella C, Kidgell DJ, Pearce AJ. Reduction in Corticospinal Inhibition in the Trained and Untrained Limb Following Unilateral Leg Strength Training. *Eur. J. Appl. Physiol*, 2012, 112, 3097–3107.
- Latella C, Teo WP, Drinkwater EJ, Kendall K, Haff GG. The acute neuromuscular responses to cluster set resistance training: A systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine*, 2019; 49(12), 1861-1877. <https://doi.org/10.1007/s40279-019-01172-z>
- Lee M, Carroll TJ. Cross Education: Possible Mechanisms for the Contralateral Effects of Unilateral Resistance Training. *Sports Med*, 2007; 37, 1–14.

- Lee M, Grandevia SC, Carroll TJ. Unilateral strength training increases voluntary activation of the opposite untrained limb. *Clinical Neurophysiology*, 2009; 120(4) 802-808.
- Lopley LK, Palmieri-Smith RM. Cross-Education Strength and activation after Eccentric Exercise. *J. Athl. Train*, 2014; 49,582–589.
- Liebson C. (2014): *Functional training handbook*. Wolters Kluwer, Lippincott Williams & Wilkins. ISBN 978-1-58255-920-9
- Liepert J, Dettmers C, Terborg C, and Weiller C. Inhibition of ipsilateral motor cortex during phasic generation of low force. *Clin Neurophysiol*, 2001; 112: 114–121,
- Lindstedt SL, LaStayo PC, Reich TE. When active muscles lengthen: properties and consequences of eccentric contractions. *News Physiol Sci*, 2001; 16 (6): 256 - 261.
- Lindstedt SL. Skeletal muscle tissue in movement and health: positives and negatives. *J Exp Biol*, 2016; 219(Pt 2):183-8. Doi: 10.1242/jeb.124297. PMID: 26792329.
- Loren ZF, Chiu MS. Does an Optimal Load Exist for Power Training? *J Strength Cond Res*, 2008, 30(2), 67-69.
- Liu D, Sartor MA, Nader GA, Gutmann L, Treutelaar MK, Pistilli EE, Iglayreger HB, Burant CF, Hoffman EP, Gordon PM. Skeletal muscle gene expression in response to resistance exercise: sex specific regulation. *BMC Genomics*, 2010; 11, 659.

## **M**

- Madarame H, Neya M, Ochi E, Nakazato K, Sato Y, Ishii N. Cross-transfer effects of resistance training with blood flow restriction. *Cross-Transfer Effects of Resistance Training with Blood Flow Restriction. Med. Sci. Sports Exerc*, 2008, 40, 258–263.
- Malliaras P, Kamal B, Nowell A, Farley T, Dhamu H, Simpson V, Morrissey D, Langberg H, Maffulli N, Reeves ND. Patellar tendon

adaptation in relation to load-intensity and contraction type. *J Biomech*, 2013; 46 (11): 1893-1899. doi:10.1016/j.jbiomech.2013.04.022

- Manca A, Dragone D, Dvir Z, Deriu F. Cross-Education of Muscular Strength Following Unilateral Resistance Training: A Meta-Analysis. *Eur. J. Appl. Physiol*, 2017; 117, 2335–2354.

- Manca A, Hortobágyi T, Carroll TJ, Enoka RM, Farthing JP, Gandevia SC, Kidgell DJ, Taylor JL, Deriu F. Contralateral Effects of Unilateral Strength and Skill Training: Modified Delphi Consensus to Establish Key Aspects of Cross-Education. *Sports Med*, 2021; 51, 11–20.

- Manca A, Hortobágyi T, Rothwell J, Deriu F. Neurophysiological Adaptations in the Untrained Side in Conjunction with Cross-Education of Muscle Strength: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J. Appl. Physiol*, 2018; 124, 1502–1518.

- Maroto-Izquierdo S. Functional and structural effects of eccentric-overload resistance training in athletes and physical active people. . (2019). University of León. León, Spain.

- Maroto-Izquierdo S, Fernandez-Gonzalo R, Magdi HR, Manzano-Rodríguez S, González-Gallego J, De Paz JA. Comparison of the Musculoskeletal Effects of Different Iso-Inertial Resistance Training Modalities: Flywheel vs. Electric-Motor. *Eur. J. Sport Sci*, 2019;19, 1184–1194

- Maroto-Izquierdo S, García-López D, de Paz JA. Functional and Muscle-Size Effects of Flywheel Resistance Training with Eccentric-Overload in Professional Handball Players. *J. Hum. Kinet*, 2017; 60, 133–143.

- Maroto-Izquierdo, S.; McBride, J.M.; Gonzalez-Diez, N.; Garcia-Lopez, D.; Gonzalez-Gallego, J.; de Paz, J.A. Comparison of Flywheel and Pneumatic Training on Hypertrophy, Strength, and Power in Professional Handball Players. *Res. Q. Exerc. Sport*, 2020; 1–15.

- Maroto-Izquierdo S, Nosaka K, Blazevich AJ, Fernandez-Gonzalo R, González-Gallego J, De Paz Fernandez JA. Effects of Unilateral Accentuated Eccentric Iso-Inertial Resistance Training on Muscle Mass

and Function of the Trained and Untrained Legs. In Proceedings of the 11th International Conference on Strength Training, Perth, Australia, 30 November–3 December 2018.

- Maroto-Izquierdo S, Nosaka K, Blazevich AJ, González-Gallego J, de Paz JA. Cross-education effects of unilateral accentuated eccentric isoinertial resistance training on lean mass and function. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2021. <https://doi.org/10.1111/sms.14108>
- Martin D, Carl K, Lehnertz K. (2001): *Manual de metodología del Entrenamiento Deportivo*. Barcelona: Paidotribo.
- Masuda K, Kikuhara N, Takahashi H, Yamanaka K. The relationship between muscle cross-sectional area and strength in various isokinetic movements among soccer players. *J Sports Sci*, 2003; 21(10), 851-8.
- McCurdy K, Langford L. Comparison of Unilateral Squat Strength between Dominant and Non-Dominant Leg in Men and Women. *Journal of Sport Science and Medicine*, 2005; 4, 153-159.
- McCurdy KW, Langford GA, Doscher MW, Wiley LP y Mallard KG. The effects of short-term unilateral and bilateral lower-body resistance training on measures of strength and power. *J Strength Cond Res*, 2005; 19:9-15,
- McGinnis PM. (2004): *Biomechanics of Sports and exercise*. 2ª edición, United States. Human Kinetics Publishers. PP 214-229.
- McHugh MP, Tetro DT. Changes in the relationship between joint angle and torque production associated with the repeated bout effect. *J Sports Sci*, 2003; 21 (11): 927-932. Doi: 10.1080/0264041031000140400
- Meylan C, Cronin J, Nosaka K. Isoinertial assessment of eccentric muscular strength. *Strength Cond J*, 2008; 30 (2): 56-64.
- Middleton P, Montero C. Eccentric muscular contraction: implications in treatment of athletes. Le travail musculaire excentrique: intérêts dans la prise en charge thérapeutique du sportif *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 2004; 47, 282–289.

- Midorikawa T, Ohta M, Torii S, Sakamoto S. Lean Soft Tissue Mass Measured Using Dual-Energy X-Ray Absorptiometry Is an Effective Index for Assessing Change in Leg Skeletal Muscle Mass Following Exercise Training. *J. Clin. Densitom*, 2018; 21, 394–398.
- Miller AE, MacDougall JD, Tarnopolsky MA, Sale DG. Gender differences in strength and muscle fiber characteristics. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1993; 66 (3), 254-262.
- Milner-Brown HS, Stein RB, Lee RG. Synchronization of human motor units: possible roles of exercise and supraspinal reflexes. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 1975; 38 (3): 245-254.
- Mina MA, Blazeovich AJ, Giakas G, Seitz LB, Kay AD. Chain-loaded variable resistance warm-up improves free-weight maximal back squat performance. *Eur J Sport Sci*, 2016; 16 (8): 932-939. doi:10.1080/17461391.2016.1199740
- Mina MA, Blazeovich AJ, Tsatalas T, Giakas G, Seitz LB, Kay AD. Variable, but not free-weight, resistance back squat exercise potentiates jump performance following a comprehensive task-specific warm-up. *Scand J Med Sci Sports*, 2019; 29 (3): 380-392. doi:10.1111/sms.13341
- Mochizuki H, Huang YZ, and Rothwell JC. Interhemispheric interaction between human dorsal premotor and contralateral primary motor cortex. *J Physiol*, 2004; 561: 331–338
- Moore, CA, Weiss LW, Schilling BK, Fry AC, Li Y. Acute Effects of Augmented Eccentric Loading on Jump Squat Performance. *J. Strength Cond. Res*, 2007; 21, 372–377.
- Morris SB. Estimating Effect Sizes from Pretest-Posttest-Control Group Designs. *Organ. Res. Methods*, 2008; 11, 364–386.
- Muellbacher W, Ziemann U, Wissel J, Dang N, Kofler M, Facchini S, Boroojerdi B, Poewe W, Hallett M. Early consolidation in human primary motor cortex. *Nature*, 2002; 415: 640 – 644.

- Munn J, Herbert RD, Gandevia SC. Contralateral effects of unilateral resistance training: a meta-analysis. *J Appl Physiol*, 2004; 96(5):1861-6.
- Munn J, Herbert RD, Hancock MJ, Gandevia SC. Training with unilateral resistance exercise increases contralateral strength. *J Appl Physiol*, 2005; 99(5):1880-4.

## N

- Naclerio AF, Leyva Rodríguez, SJ & Forte D. Determinación de los Niveles de Fuerza Máxima Aplicada, Velocidad y Potencia por Medio de un Test Creciente en Sentadilla Profunda con Barra Libre, en Levantadores Españoles. 2005. PubliCE Standard. 29/08/2005. PID: 508.
- Naclerio, F. 2010. Entrenamiento Deportivo. Fundamentos y aplicaciones en diferentes deportes, Madrid, España, Ed. Panamericana.
- Naclerio, F. (2019): *Entrenamiento deportivo: Fundamentos y aplicaciones en diferentes deportes*. Panamericana. ISBN: 9788498353310
- Newton MJ, Morgan GT, Sacco P, Chapman DW, Nosaka K. Comparison of responses to strenuous eccentric exercise of the elbow flexors between resistance-trained and untrained men. *J Strength Cond Res*, 2008; 22(2): 597-607. doi:10.1519/JSC.ob013e3181660003
- Newton RU, Murphy AJ, Humphries BJ, Wilson GJ, Kraemer WJ, Hakkinen K. Influence of load and stretch shortening cycle on the kinematics, kinetics and muscle activation that occurs during explosive upper-body movements. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1997; 75 (4): 333-342. Doi: 10.1007/s004210050169
- Nilo Dos Santos WD, Gentil P, Lima de Araujo Ribeiro A, Vieira CA, Martins WR Effects of variable resistance training on maximal strength: a meta-analysis. *J Strength Cond Res*, 2018; 32 (11): e52-e55. doi:10.1519/JSC.0000000000002836
- Norrbrand L, Fluckey JD, Pozzo M, Tesch PA. Resistance training using eccentric overload induces early adaptations in skeletal muscle size. *Eur J Appl Physiol*, 2008; 102(3) 271-81. Epub 2007 Oct 10.

**O**

- Ojasto T, Hakkinen K. Effects of different accentuated eccentric load levels in eccentric-concentric actions on acute neuromuscular, maximal force, and power responses. *J Strength Cond Res*, 2009; 23 (3): 996-1004. doi:10.1519/JSC.ob013e3181a2b28e.
- Ortega JO, Lindstedt S, Nelson FE, Jubrias SA, Kushmerick MJ, Conley KE. Muscle force, work and cost: a novel technique to revisit the Fenn effect. *J. Exp. Biol*, 2015; 218, 2075-2082

**P**

- Paddon-Jones D, Leveritt M, Lonergan A, Abernethy P. Adaptation to chronic eccentric exercise in humans: the influence of contraction velocity. *Eur J Appl Physiol*, 2001;85(5):466-71.
- Penailillo L, Blazevich A, Numazawa H, Nosaka K. Metabolic and muscle damage profiles of concentric versus repeated eccentric cycling. *Med Sci Sports Exerc*, 2013; 45 (9): 1773-1781. doi:10.1249/MSS.ob013e31828f8a73
- Pierrot-Deseilligny E, Burke D. (2005): *Circuitry of the Human Spinal Cord*: Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Ploutz LL, Tesch PA, Biro RL, Dudley GA. Effect of resistance training on muscle use during exercise. *J Appl Physiol*, 1994; 76: 1675–1681
- Pocock, G., Richards, C. D. (2005): *Fisiología humana, la base de la medicina. (2a Ed)*. Barcelona. Masson.
- Proske U, Allen TJ. Damage to skeletal muscle from eccentric exercise. *Exerc Sport Sci Rev*, 2005; 33 (2): 98-104

**R**

- Ramirez Varela A, Pratt M, Borges C, Hallal PC. (2016): *1st Physical Activity Almanac: The Global Observatory for Physical Activity—GoPA!* (p. 203). International Society for Physical Activity and Health.
- Ranganathan VK, Siemionow V, Liu JZ, Sahgal V, Yue GH. From mental power to muscle power—gaining strength by using the mind. *Neuropsychologia*, 2004; 42(7):944-56.

- Ratamess NA. (2012): *ACSM's foundations of strength training and conditioning*. Wolters Kluwer Health/Lippincott Williams & Wilkins. . ISBN 978-0-7817-8267-8
- Ravé González JM, Valdivieso Abella CP. (2014): *Entrenamiento deportivo: Teoría y prácticas*. Panamericana. ISBN. 9788498357837
- Reeves ND, Maganaris CN, Longo S, Narici MV. Differential adaptations to eccentric versus conventional resistance training in older humans. *Exp Physiol*, 2009; 94 (7): 825-833. doi:10.1113/expphysiol.2009.046599
- Rodríguez D R; Fajardo J T. (2010): *Prevención de lesiones en el deporte: Claves para el rendimiento deportivo óptimo*. Panamericana. ISBN. 9788498352788.
- Roig M, O'Brien K, Kirk G, Murray R, McKinnon P, Shadgan B, Reid WD. The effects of eccentric versus concentric resistance training on muscle strength and mass in healthy adults: a systematic review with meta-analysis. *Br J Sports Med* 2009; 43(8):556-68.
- Roig M, Ranson C. Eccentric muscle actions: implications for injury prevention and rehabilitation. *Phys Ther Sport*, 2007; 8 (2): 88 - 97.
- Roig M, Shadgan B, Reid WD. Eccentric exercise in patients with chronic health conditions: a systematic review. *Physiother Can*, 2008; 60 (2): 146-160. doi:10.3138/physio.60.2.146
- Ruddy KL, Carson RG. Neural Pathways Mediating Cross Education of Motor Function. *Front. Hum. Neurosci*, 2013; 7.

## S

- Saeterbakken AH, van den Tillaar R, Seiler S. Effect of core stability training on throwing velocity in female handball players. *J Strength Cond Res*, 2011; 25 (3): 712-718. doi:10.1519/JSC.ob013e3181cc227e
- Saeterbakken AH, Andersen V, van den Tillaar R. Comparison of kinematics and muscle activation in free-weight back squat with and without

elastic bands. *J Strength Cond Res*, 2016; 30 (4): 945-952. doi:10.1519/JSC.0000000000001178

- Santana JC, Vera-Garcia FJ y McGill SM. A kinetic and electromyographic comparison of the standing cable press and bench press. *J Strength Cond Res*, 2007; 21:1271-1277.

- Sariyildiz M, Karacan I, Rezvani A, Ergin O, and Cidem M. Cross-education of muscle strength: cross-training effects are not confined to untrained contralateral homologous muscle. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 2011; 21(6):E359-E64.

- Schiaffino S, Dyar KA, Ciciliot S, Blaauw B, Sandri M. Mechanisms Regulating Skeletal Muscle Growth and Atrophy. *FEBS J*, 2013; 280, 4294–4314.

- Schlumberger A, Stec J, Schmidbleicher D. Single- vs. Multiple-set strength training in women. *J Strength Cond Res*, 2001; 15(3):284-9.

- Schoenfeld BJ. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *J Strength Cond Res*, 2010; 24(10), 2857-2872. <https://doi.org/10.1519/JSC.0b013e3181e840f3>

- Schoenfeld, Brad. (2016): *Science and development of muscle hypertrophy*. Human Kinetics. ISBN: 978-1-4925-1960-7

- Schoenfeld B J, Grgic, J. Does training to failure maximize muscle hypertrophy? *Strength Cond J*, 2019. <https://doi.org/10.1519/SSC.0000000000000473>

- Schoenfeld BJ, Grgic J. Eccentric overload training: a viable strategy to enhance muscle hypertrophy? *Strength Cond J*, 2018; 40 (2): 78-81.

- Schoenfeld BJ, Ogborn D, Krieger, JW. Effects of resistance training frequency on measures of muscle hypertrophy: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med*, 2016; 46(11), 1689-1697. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0543-8>

- Schoenfeld BJ, Ogborn D, Krieger, JW. Dose-response relationship between weekly resistance training volume and increases in muscle mass: A

systematic review and meta-analysis. *Journal of Sports Sciences*, 2017a; 35(11), 1073-1082. <https://doi.org/10.1080/02640414.2016.1210197>

- Schoenfeld BJ, Ogborn D, Vigotsky AD, Franchi M, Krieger JW. Hypertrophic effects of concentric versus eccentric muscle actions: A systematic review and meta-analysis. *J Strength Cond Res*, 2017b; Doi:10.1519/JSC.0000000000001983
- Scripture EW, Smith TL, Brown EM. On the education of muscular control and power. *Studies from Yale Psychological Laboratory*. 1894(2) 114-9.
- Seger JY, Thorstensson A. Effects of eccentric versus concentric training on thigh muscle strength and EMG. *Int J Sports Med* 2005; 26(1):45-52.
- Semmler JG and Nordstrom MA. Motor unit discharge and force tremor in skill- and strength-trained individuals. *Exp Brain Res*, 1998; 119: 27–38.
- Seynnes OR, de Boer M, Narici MV. Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training. *J Appl Physiol*, 2007; 102 (1): 368-373. doi:10.1152/jappphysiol.00789.2006
- Shellock FG, Fukunaga T, Min, JH. Edgerton, VR. Acute effects of exercise on MR imaging of skeletal muscle: concentric vs eccentric actions. *AJR Am J Roentgenol*, 1991; 156(4), 765-8
- Sheppard J, Newton R, McGuigan M The effect of accentuated eccentric load on jump kinetics in high-performance volleyball players. *Int J Sports Sci Coach*, 2007; 2 (3): 267-273.
- Sheppard JM, Young K. Using additional eccentric loads to increase concentric performance in the bench press throw. *J Strength Cond Res*, 2010; 24 (10): 2853-2856
- Shima N, Ishida K, Katayama K, Morotome Y, Sato Y, Miyamura M. Cross education of muscular strength during unilateral resistance training and detraining. *Eur J Appl Physiol*, 2002; 86(4):287-94.
- Siff MC, Verkhoshansky Y. *Superentrenamiento*. 2000. Barcelona: Paidotribo.

- Sohn YH, Jung HY, Kaelin-Lang A, and Hallett M. Excitability of the ipsilateral motor cortex during phasic voluntary hand movement. *Exp Brain Res*, 2003; 148: 176–185.
- Soria-Gila MA, Chiroso IJ, Bautista IJ, Baena S, Chiroso LJ. Effects of variable resistance training on maximal strength: A meta-analysis. *J Strength Cond Res*, 2015; 29 (11): 3260-3270. doi:10.1519/JSC.0000000000000971
- Staron RS, Hagerman FC, Hikida RS, Murray TF, Hostler DP, Crill MT, Ragg KE, Toma K. Fiber type composition of the vastus lateralis muscle of young men and women. *J Histochem Cytochem*, 2000; 48(5), 623-629
- Staron RS, Karapondo DL, Kraemer WJ, Fry AC, Gordon SE, Falkel JE, Hagerman FC, Hikida RS. Skeletal muscle adaptations during early phase of heavy-resistance training in men and women. *J Appl Physiol*, 1994; 76(3):1247-55.
- Stinear CM, Walker KS, and Byblow WD. Symmetric facilitation between motor cortices during contraction of ipsilateral hand muscles. *Exp Brain Res*, 2001; 139: 101–105
- Stone M, Plisk S, Collins D. Training principles. Evaluation of modes and methods of resistance training: A coaching perspective. *Sports Biomech*, 2002; 1 (1): 79-103. Doi: 10.1080/14763140208522788
- Strens LH, Fogelson N, Shanahan P, Rothwell JC, and Brown P. The ipsilateral human motor cortex can functionally compensate for acute contralateral motor cortex dysfunction. *Curr Biol*, 2003; 13: 1201–1205.
- Suchomel TJ, Nimphius S, Bellon CR, Stone MH. The importance of muscular strength: Training considerations. *Sports Med*, 2018, 48(4), 765-785. <https://doi.org/10.1007/s40279-018-0862-z>
- Suchomel TJ, Nimphius S, Stone MH. The Importance of muscular strength in athletic performance. *Sports Med*, 2016; 46(10), 1419-1449. <https://doi.org/10.1007/s40279-016-0486-0>

## T

- Taniguchi Y, Burle B, Vidal F, Bonnet M. Deficit in motor cortical activity for simultaneous bimanual responses. *Exp Brain Res*, 2001; 137(3-4):259-68.
- Tesch PA, Ekberg A, Lindquist DM, Trieschmann JT Muscle hypertrophy following 5-week resistance training using a non-gravity-dependent exercise system. *Acta Physiol Scand*, 2004a; 180 (1): 89-98. doi:10.1046/j.0001-6772.2003.01225.x
- Tesch PA, Thorsson A, Colliander EB. Effects of eccentric and concentric resistance training on skeletal muscle substrates, enzyme activities and capillary supply. *Acta Physiol Scand*, 1990; 140(4), 575-580. <https://doi.org/10.1111/j.1748-1716.1990.tb09035.x>
- Tinwala F, Cronin J, Haemmerle E, Ross A. Eccentric Strength Training: A Review of the Available Technology. *Strength Cond J*. 2017, 39, 32-47.
- Toigo M, Boutellier U. New fundamental resistance exercise determinants of molecular and cellular muscle adaptations. *Eur J Appl Physiol*, 2006; 97 (6): 643-663. Doi: 10.1007/s00421-006-0238-1
- Tricoli V, Lamas L, and Carnevale R, Ugrinowitsch C. Short-term effects on lower-body functional power development: weightlifting vs. Vertical jump training programs. *J Strength Cond Res*, 2005; 19(2), 433-437.
- Tseng WC, Nosaka K, Tseng KW, Chou TY, Chen TC. Contralateral Effects by Unilateral Eccentric versus Concentric Resistance Training. *Med Sci Sports Exerc*. 2020 Feb; 52(2):474-483. doi: 10.1249/MSS.0000000000002155. PMID: 31524834.
- Turner A. (2018): *Routledge handbook of strength and conditioning: Sport-specific programming for high performance*. Routledge. ISBN: 978-1-138-68724-0
- Turner A, Comfort P (2018): *Advanced Strength and Conditioning An Evidence-based Approach*. Routledge. ISBN: 978-1-138-68736-3.

**V**

- Valdes O, Ramirez C, Perez F, Garcia-Vicencio S, Nosaka K, Penailillo L. Contralateral effects of eccentric resistance training on immobilized arm. *Scand J Med Sci Sports*. 2021 Jan; 31(1):76-90. Doi: 10.1111/sms.13821. Epub 2020 Sep 22. PMID: 32897568.
- Vallejo AF, Schroeder ET, Zheng L, Jency NE, Sattler FR. Cardiopulmonary responses to eccentric and concentric resistance exercise in older adults. *Age Ageing*, 2006; 35(3), 291-7.
- Van Cutsem M, Duchateau J, Hainaut K. Changes in single motor unit behaviour contribute to the increase in contraction speed after dynamic training in humans. *J Physiol*, 1998; 513: 295–305
- Vergara-Aragon P, Gonzalez CL, and Wishaw IQ. A novel skilled-reaching impairment in paw supination on the “good” side of the hemi-Parkinson rat improved with rehabilitation. *J Neurosci* , 2003; 23: 579–586
- Verkhoshansky Y. (2002): *Teoría y metodología del Entrenamiento Deportivo*. Barcelona: Paidotribo.
- Verstynen T, Diedrichsen J, Albert N, Aparicio P, Ivry RB. Ipsilateral motor cortex activity during Unimanual hand movements relates to task complexity. *J Neurophysiol*, 2005; 93: 1209–1222.
- Vieluf S, Godde B, Reuter EM, Voelcker-Rehage C. Effects of age and fine motor expertise on the bilateral deficit in force initiation. *Exp Brain Res*, 2013; 231(1):107-16.
- Vogt M, Hoppeler HH. Eccentric exercise: mechanisms and effects when used as training regime or training adjunct. *J Appl Physiol*, 2014; 116(11):1446-54. Doi: 10.1152/jappphysiol.00146.2013. Epub 2014 Feb 6. PMID: 24505103.

**W**

- Wagle JP, Taber CB, Cunanan AJ, Bingham GE, Carroll M, DeWeese BH, Sat K, Stone MH. Accentuated Eccentric Loading for Training and Performance: A Review. *Sports Med*, 2017; 47, 2473–2495.

- Walker S, Blazeovich AJ, Haff GG, Tufano JJ, Newton RU, Hakkinen K. Greater strength gains after training with accentuated eccentric than traditional isoinertial loads in already strength-trained men. *Front Physiol*, 2016; 7 149. doi:10.3389/fphys.2016.00149
- Watkins J. (1999). *Structure and function of the musculoskeletal system*. Champaign IL: Human Kinetics
- Weineck J. 2005). *Entrenamiento total*. Barcelona: paidotribo.
- Weir JP, Housh DJ Housh TJ, Weir LL. The Effect of Unilateral Eccentric Weight Training and Detraining on Joint Angle Specificity, Cross-Training, and the Bilateral Deficit. *J. Orthop. Sports Phys. Ther*, 1995; 22, 207–215.
- Wernbom M, Augustsson J, Thomee R. The influence of frequency, intensity, volume and mode of strength training on whole muscle cross-sectional area in humans. *Sports Med*, 2007; 37 (3), 225-264. <https://doi.org/10.2165/00007256-200737030-00004>
- Westing SH, Cresswell AG, Thorstensson A. Muscle activation during maximal voluntary eccentric and concentric knee extension. *Eur J Appl Physiol*, 1991; 62 (2): 104 - 108.
- Wiest M, Dagnese F, Carpes F. Strength symmetry and imprecise sense of effort in knee extension. *Kinesiology*, 2010; 42(2), 164-168.
- Willoughby DS, Nelson MJ. Myosin heavy-chain mRNA expression after a single session of heavy-resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 2002; 34(8):1262-9.

## Y

- Yamauchi J, Nakayama S, Ishii N. Effects of bodyweight-based exercise training on muscle functions of leg multi-joint movement in elderly individuals. *Geriatr Gerontol Int*, 2009; 9 (3): 262-269. doi:10.1111/j.1447- 0594.2009.00530
- Yarrow JF, Borsa PA, Borst SE, Sitren HS, Stevens BR, White LJ. Early-phase neuroendocrine responses and strength adaptations following

eccentric-enhanced resistance training. *J Strength Cond Res*, 2008; 22 (4): 1205-1214. doi:10.1519/JSC.0b013e31816eb4a0

- Yue G, Cole KJ. Strength increases from the motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions. *J Neurophysiol*, 1992; 67: 1114–1123

## Z

- Zhou S. Cross education and neuromuscular adaptations during early stage of strength training. *Journal of exercise Science and fitness*, 2003; 1(1) 54-60.

- Zhou S. Chronic neural adaptations to unilateral exercise: Mechanisms of cross education. *Exercise and Sport Science Reviews*, 2000; (28)177-184.

- Zhou S, Oakman A, Davie A. Effects of unilateral voluntary and electromyostimulation training on muscular strength of the contralateral limb. *Hong Kong Journal of Sports Medicine & Sports Science*, 2002; 14:1-11.

- Zijdwind I, Kernell D. Bilateral interactions during contractions of intrinsic hand muscles. *J Neurophysiol*, 2001; 85: 1907–1913

- Zoeller RF, Angelopoulos TJ, Thompson BC, Wenta MR, Price TB, Thompson PD, Moyna NM, Seip RL, Clarkson PM, Gordon PM, Pescatello LS, Devaney JM, Gordish-Dressman H, Hoffman EP, Visich PS. Vascular Remodeling in Response to 12 Wk of Upper Arm Unilateral Resistance Training. *Med. Sci. Sports Exerc*, 2009; 41, 2003–2008.

- Zult T, Goodall S, Thomas K, Hortobagyi T, Howatson G. Mirror Illusion Reduces Motor Cortical Inhibition in the Ipsilateral Primary Motor Cortex during Forceful Unilateral Muscle Contractions. *J. Neurophysiol*, 2015; 113, 2262–2270.

- Zult T, Howatson G, Kadar EE, Farthing JP & Hortobagyi T. Role of the mirror-neuron system in cross-education. *Sports Medicine*, 2014; (44)159-178.

## WEBGRAFÍA

(<https://www.who.int/es/publications/i/item/9789240014886>),

(<https://www.randomizer.at>)