

EFFECTOS DEL ENTRENAMIENTO AL FALLO EN LA FUERZA E HIPERTOFIA MUSCULAR.

ANÁLISIS Y ÚLTIMAS EVIDENCIAS

FISIOTERAPIA + CAFYD

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



Realizado por: Daniel Xesús García

Rodríguez Nº Expediente:

Grupo TFG: Mix-61

Año Académico: 2021-2022

Tutor/a: José Ramón Bonal Sánchez

Área: Revisión Bibliográfica

Resumen

El sector fitness ha ido evolucionando a lo largo de los años, pasando de centrarse únicamente en los cambios estéticos empíricos, a demostrar con estudios experimentales más elaborados que ocurre a nivel biológico en el cuerpo humano. Está más que probado que una mejor composición corporal y unos valores altos de fuerza muscular reducen el riesgo de padecer multitud de patologías, incrementando la funcionalidad y esperanza de vida. En esta revisión bibliográfica se tratarán los efectos que tiene el entrenamiento de resistencia sobre la fuerza y masa muscular, si este es aplicado hasta el fallo muscular (no poder realizar más repeticiones en una serie). Dando respuesta, a si es la mejor opción a la hora de maximizar el desarrollo muscular y aumentar los niveles de fuerza.

Se seleccionaron diversas bases de datos científicas (SPORTDiscus, E-Journals, MEDLINE complete o Rehabilitation and Sports Medicine Source) recogiendo literatura de estos 10 últimos años (2012-2021). Todos los artículos debían adaptarse al objetivo principal propuesto: analizar si el entrenamiento al fallo muscular induce a mejoras significativas en la fuerza e hipertrofia muscular.

Los resultados obtenidos muestran que realizar un programa de entrenamiento de resistencia mejora la arquitectura neuro-muscular si es llevado hasta el fallo muscular. La evidencia recoge que la alta intensidad conseguida con esta estrategia logra estimular todo el rango mio-fibrilar. Permitiendo adaptaciones agudas y crónicas a nivel hipertrófico [grosor muscular (MT) y área de sección transversal anatómica (ACSA)] y en la fuerza [fuerza máxima (1 RM), producción de fuerza por unidad de tiempo (RFD), y fuerza de contracción isométrica máxima voluntaria (MVIC)]. Sin embargo, los autores no han observado significancia estadística respecto a no aplicarlo (dejando una o varias repeticiones previo a fallar). No pudiendo hacer recomendaciones únicas, como técnica “Gold Standard”.

El volumen y la intensidad son variables clave: rangos estímulo-fatiga elevados promueven ganancias hipertróficas y de fuerza. En futuras investigaciones debe precisarse si vale o no la pena el esfuerzo extra que implica el fallo en la repetición, su frecuencia y en que sectores poblacionales es más adecuado su uso.

Abstract

The fitness sector has evolved over the years, going from focusing solely on empirical aesthetic changes, to demonstrating with more elaborate experimental studies that it occurs at a biological level in the human body. It is more than proven that a better body composition and high muscle strength values reduce the risk of suffering from a multitude of pathologies, increasing functionality and life expectancy. In this bibliographic review, the effects of resistance training on strength and muscle mass will be discussed, if this is applied until muscular failure (not being able to perform more repetitions in a series). Giving an answer to whether it is the best option when it comes to maximizing muscle development and increasing strength levels.

Various scientific databases (SPORTDiscus, E-Journals, MEDLINE complete or Rehabilitation and Sports Medicine Source) were selected, collecting literature from the last 10 years (2012-2021). All articles had to be adapted to the proposed main objective: to analyse whether training to muscle failure induces significant improvements in muscle strength and hypertrophy.

The results obtained show that carrying out a resistance training program improves the neuro-muscular architecture if it is taken to muscular failure. The evidence shows that the high intensity achieved with this strategy manages to stimulate the entire myofibrillar range. Allowing acute and chronic adaptations at the hypertrophic level [muscle thickness (MT) and anatomical cross-sectional area (ACSA)], in the force [maximal force (1RM), force production per unit of time (RFD), and maximal voluntary isometric contraction force (MVIC)]. However, the authors have not observed statistical significance regarding not applying it (leaving one or several repetitions before failing). Not being able to make unique recommendations, such as the "Gold Standard" technique.

Volume and intensity are key variables: high stimulus-fatigue ratios promote hypertrophic and strength gains. In future research it should be specified whether or not it is worth the extra effort that failure in repetition implies, its frequency and in which population sectors its use is most appropriate.

Índice

| | |
|--|----|
| Índice..... | 4 |
| Índice de figuras | 5 |
| 1. Introducción | 6 |
| 2. Objetivos..... | 10 |
| 2.1. Principal | 10 |
| 2.2. Secundarios | 10 |
| 3. Metodología | 11 |
| 3.1. Diseño | 11 |
| 3.2. Estrategia de búsqueda | 11 |
| 3.3. Criterios de selección | 12 |
| 3.4. Diagrama de flujo | 13 |
| 4. Resultados..... | 14 |
| 4.1. Cuadro resumen de los artículos empleados | 14 |
| 4.2. Resumen artículos empleados..... | 20 |
| 5. Discusión | 31 |
| 5.1. El fallo muscular mejora las ganancias de fuerza e hipertrofia | 31 |
| 5.2. ¿Evitar el fallo muscular maximiza la fuerza y masa muscular? | 36 |
| 5.3. La carga y el fallo muscular en las adaptaciones neurales e hipertróficas.... | 37 |
| 5.4. El tiempo de la repetición y el fallo muscular en la fuerza e hipertrofia ... | 39 |
| 6. Futuras líneas de investigación | 41 |
| 7. Conclusiones | 43 |
| 8. Referencias bibliográficas..... | 44 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Diagrama de flujo de los artículos..... | 13 |
| Figura 2. Cuadro resumen de los 16 artículos consultados. | 14 |

1. Introducción

En esta revisión bibliográfica se realizará un análisis pormenorizado sobre los efectos que tiene a nivel neural y musculoesquelético practicar un entrenamiento que conlleve realizar repeticiones hasta provocar la fatiga o extenuación muscular (no poder realizar una repetición más en una serie). Aplicar la idea de fallo muscular en el entrenamiento, es un debate que hoy en día continúa dándose en los centros de entrenamiento, entre los profesionales del sector fitness, como en el alto rendimiento.

Por lo tanto, es importante en primer lugar, que el lector conozca de manera verosímil las bases e investigaciones que existen hoy en día, sobre cómo responde el sistema nervioso y musculoesquelético al ser sometido a un entrenamiento de resistencia. Además, los efectos agudos y crónicos que inducen el crecimiento muscular, hipertrofia, activación de las fibras T-1 (bajo umbral) y T-2 (alto umbral); como de las ganancias en la fuerza máxima (1-RM).

Si el lector se encuentra interesado en mejorar sus niveles de fuerza y masa muscular o enseñar a un cliente como hacerlo, debe saber que el realizar un programa de entrenamiento de resistencia (RT) a alta intensidad (HI-RT), levantando cargas superiores al 60% de su repetición máxima (1-RM); le harán maximizar sus ganancias de fuerza e hipertrofia (Nóbrega y Libardi, 2016). El tamaño muscular y las adaptaciones neurales inducidas por el ejercicio se encuentran reguladas mediante un fenómeno llamado “mecano-transducción”: la fuerza aplicada durante el entrenamiento provoca señales químicas anabólicas y catabólicas a nivel intramuscular, derivando en un superávit (o síntesis proteica) a nivel corporal (Ogborn y Schoenfeld, 2014). Estas respuestas hormonales, generan la acumulación de proteínas contráctiles a nivel muscular, produciendo un incremento (> 50%) del área de sección transversal (CSA) del músculo; después de 16 semanas de entrenamiento (Schoenfeld et al., 2015).

De la misma manera, Grgic y Schoenfeld (2018) comunican lo que la evidencia esclarece: afirmando que entrenar en un rango de 6 a 12 repeticiones (RM) es lo

ideal para maximizar la hipertrofia muscular. Con ello, también se ha comprobado que el entrenamiento con cargas bajas ($\leq 60\%$ RM) ejecutado hasta el fallo muscular, incrementa el CSA con resultados similares a si se aplica con cargas altas ($> 60\%$ 1RM) (Grgic y Schoenfeld, 2018).

Es importante considerar el volumen de entrenamiento para conocer cómo se adaptan las fibras a la estimulación aguda y sobrecarga crónica (Schoenfeld et al., 2019). Por eso Schoenfeld et al. (2019) dicen que, en sujetos entrenados en resistencia, se aprecian incrementos en el desarrollo muscular y en la fuerza 1-RM con apenas 3 sesiones a la semana de 13 min. a lo largo de 8 semanas. También han observado que la hipertrofia muscular presenta una dosis-respuesta: a mayor volumen de entrenamiento (con alta intensidad), mayor capacidad de desarrollo muscular (“es considerable aumentar la cantidad de tiempo semanal para conseguir este objetivo, según la adaptaciones individuales a la carga”).

En hilo con lo mencionado anteriormente, Grgic et al. (2021) expusieron en su metaanálisis el “principio de tamaño de Henneman”: a mayor producción de fuerza, mayor reclutamiento de unidades motoras (UM) a nivel muscular. En primer lugar, se activarán las pequeñas o de bajo umbral, para posteriormente activarse las grandes o de alto umbral. Las UM de bajo umbral se distribuyen en las fibras musculares de T-1 y las UM de alto umbral en las de T-2. Por lo tanto, a mayor carga o intensidad de trabajo, se van activando mayor cantidad de fibras musculares para seguir manteniendo la fuerza (desde las fibras de T-1 a las de T-2, pasando por la fatiga de las T-1 en primer lugar). Se concluye: la realización de ejercicios hasta la fatiga muscular (máximo de repeticiones x serie) son necesarios para reclutar todas las UM disponibles, induciendo a mejores resultados hipertróficos y de fuerza (Grgic et al., 2021).

Respecto a las ganancias de fuerza máxima (1-RM) muscular, González et al. (2017) comparan dos protocolos de prensa de piernas hasta el fallo muscular al 70% y 90% del 1RM. Constatando mediante electromiografía (EMG) que ambos entrenamientos, fueron similares en activación muscular.

Según estos investigadores, se respalda la importancia tanto del volumen (incluye más repeticiones en el del 70%) e intensidad (mayor en el 90%) durante el

entrenamiento. Otorgando una doble efectividad para la mejora de adaptaciones neurales y estructurales a nivel neuromuscular (González et al., 2017).

En base al objetivo principal de esta revisión (analizar si el entrenamiento al fallo muscular induce a mejoras significativas en la fuerza e hipertrofia muscular), es necesario ahondar y hacerse esta pregunta: ¿Por qué los investigadores están tan interesados en sacar conclusiones sobre este tema, desde los últimos años hasta la actualidad? A continuación, se explicará si ir hasta el fallo muscular en una serie puede ser determinante para mejorar los niveles de fuerza y la estructura musculoesquelética del cuerpo humano. Así se podrá dar luz sobre grises a preparadores físicos y población deportista, tan interesados en obtener el más actualizado conocimiento para plantear objetivos estéticos y de salud.

Jenkins et al. (2017) resaltan que el entrenamiento de resistencia en hombres desentrenados realizado al fallo muscular, mejora las ganancias hipertróficas y valores de fuerza muscular; tanto con cargas bajas (30% 1RM) como con altas (> 80% RM). Provocando resultados hipertróficos similares y aumentos en la fuerza, superiores con cargas altas (Jenkins et al., 2017).

Según Lacerda et al. (2021) una repetición más prolongada (6 s.) con mayor “Time Under Tensión” (TUT) vs. una repetición más corta (2 s.) en extensiones de rodillas produce mayores ganancias de fuerza isométrica en el cuádriceps, si es llevada hasta el fallo. En cambio, no hubo diferencias en la hipertrofia entre ambos protocolos. Considerando qué a similar volumen de entrenamiento, el realizar acciones hasta el fallo de manera lenta, es óptimo para ganar fuerza y no tan relevante para hipertrofiar el músculo (Lacerda et al., 2021). Sin embargo, Martorelli et al. (2017) investigaron si el entrenamiento al fallo producía mejoras a corto plazo a nivel neuromuscular en mujeres jóvenes, no logrando establecer significación vs. evitar el fallo (con un volumen igualado). También, Santaniello et al. (2020) demostraron que un protocolo al fallo muscular (RT-F) y otro que evita el fallo (RT-NF) tuvieron la misma efectividad para promover el grosor y la fuerza muscular en personas entrenadas, después de 10 semanas de entrenamiento.

Ante la escala de grises que aborda este concepto desde hace muchos años, con las múltiples variables del entrenamiento que entran en juego (carga, volumen,

frecuencia, intensidad, fatiga, duración de la repetición y estimular o no el músculo hasta inducir el fallo), estando varias de ellas entre los objetivos secundarios propuestos en esta revisión. Se pretende aclarar, comparar y establecer conclusiones que puedan ser una recomendación útil y efectiva para todo aquel que desee mejorar su fuerza y masa muscular (por lo tanto, su salud). El tema analizado se encuentra en auge, lo cual se observa en la mejora de la calidad metodológica y evidencia de los estudios, de los últimos 5 años.

2. Objetivos

2.1. *Principal*

- Analizar si el entrenamiento al fallo muscular induce a mejoras significativas en la fuerza e hipertrofia muscular.

2.2. *Secundarios*

- Determinar si resulta en mayores ganancias de fuerza y masa muscular realizar un programa de entrenamiento hasta el fallo muscular, respecto a no hacerlo.
- Comprobar si una carga baja o alta (% RM) ejecutada hasta la fatiga muscular, resulta en mejores adaptaciones neurales e hipertróficas.
- Establecer si una menor o mayor duración de la repetición (TUT) hasta el fallo muscular (dosis-respuesta) maximiza la hipertrofia y fuerza muscular.

3. Metodología

3.1. *Diseño*

Se ha realizado una revisión bibliográfica en las bases de datos científicas recogiendo la literatura y evidencia, que más se adhería a la temática a tratar: “Efectos del entrenamiento al fallo en la fuerza e hipertrofia muscular”. Las plataformas seleccionadas fueron “SPORTDiscus with Full Text, SPORTDiscus, E-Journals, MEDLINE Complete y Rehabilitation and Sports Medicine Source”, utilizando las palabras clave de búsqueda: (“Resistance training” AND “Repetitions failure OR non failure” AND “Muscle hypertrophy” NOT “Blood flow restriction OR Occlusion training OR Restriction of blood flow OR Partial occlusion OR Kaatsu OR BFR”). Presentando unos registros iniciales de 104 artículos en total con enlace a texto completo (20 en SPORTDISCUS with Full Text, 20 en SPORTDiscus, 16 en E-Journals, 38 en MEDLINE Complete, y 10 en Rehabilitation and Sports Medicine Source).

3.2. *Estrategia de búsqueda*

Se inicia con la selección de las bases de datos mencionadas en el diseño (un total de 5 plataformas científicas), previo a introducir las palabras clave que aportarán los primeros resultados de búsqueda; esclareciendo la cantidad de evidencia existente sobre el tema. La primera búsqueda se realiza a “texto completo”, no siendo relevante la aparición de artículos sin tener acceso directo, hallando 104 artículos. Después, se introduce la información: “publicaciones académicas (arbitradas)” y el idioma “inglés”, reduciendo su número a 88 artículos. En una tercera búsqueda se establece la fecha para limitar los artículos por año de publicación, siendo entre 2012-2021 y quedando 83 artículos como resultado final de búsqueda. Se comprueba, que finalmente se recogen 41 artículos ya que “las repeticiones exactas se eliminaron de los resultados”. Estos 41 artículos serán analizados en mayor profundidad. De esta muestra se realizará el cribado en base

a los criterios de inclusión/exclusión, quedando así, los más adecuados para aportar lucidez y peso científico.

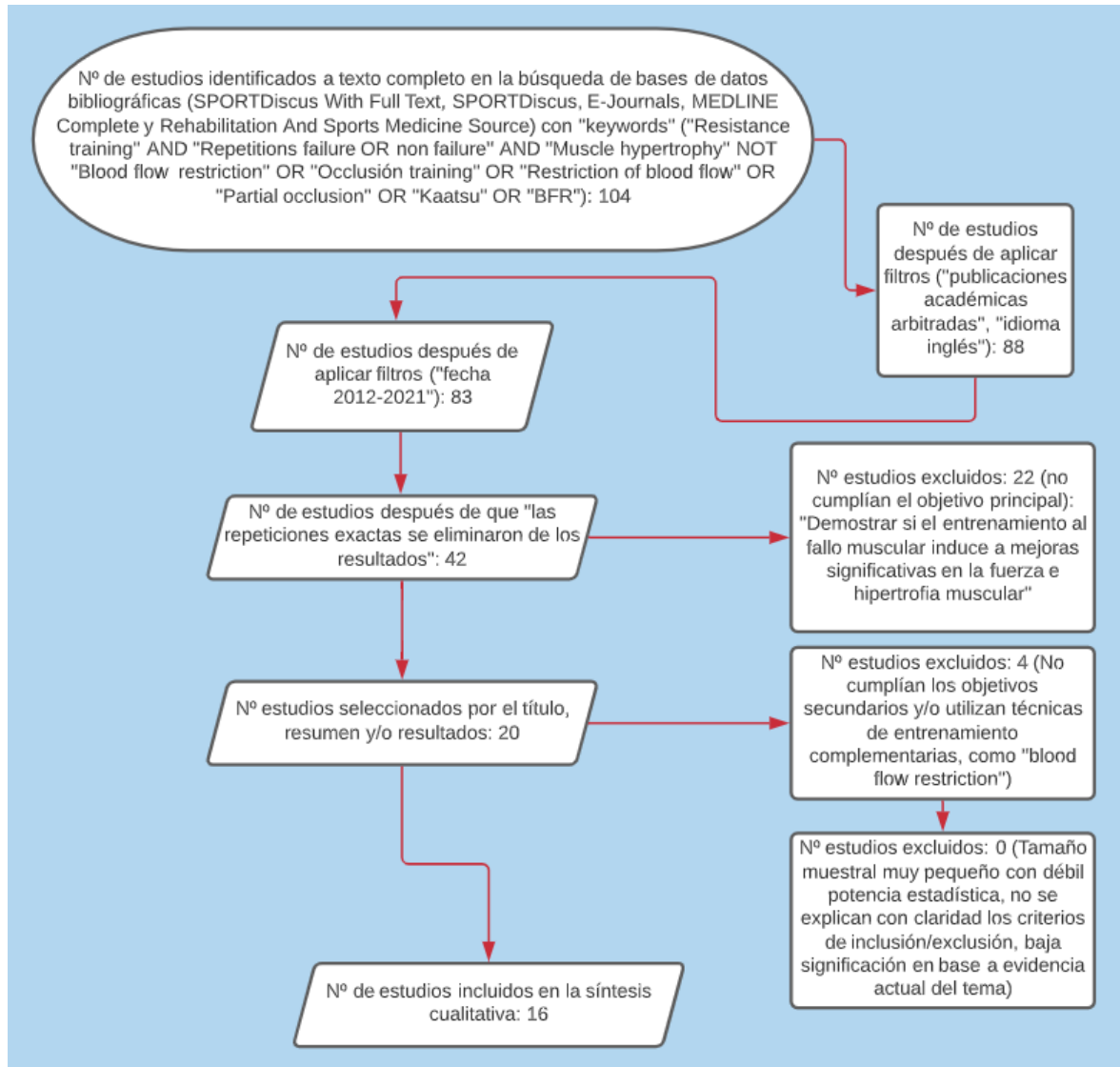
3.3. ***Criterios de selección***

Como primer criterio de inclusión: considerar si se adaptan los artículos al objetivo principal propuesto (Analizar si el entrenamiento al fallo muscular induce a mejoras significativas en la fuerza e hipertrofia muscular) una vez leídos los resúmenes y en su defecto, también analizando los resultados. El segundo criterio de inclusión: los artículos deben ser esclarecedores u relevantes en base a los objetivos secundarios propuestos (Determinar si resulta en mayores ganancias de fuerza y masa muscular realizar un programa de entrenamiento hasta el fallo muscular, respecto a no hacerlo. Comprobar si una carga baja o alta (%RM) ejecutada hasta la fatiga muscular, resulta en mejores adaptaciones neurales e hipertróficas. Establecer si una menor o mayor duración de la repetición (TUT) hasta el fallo muscular (dosis-respuesta) maximiza la hipertrofia y fuerza muscular). Tercer criterio de inclusión: cualquier grupo poblacional o edad. Cuarto criterio de inclusión: fecha de publicación de los estudios entre el 2012 y 2021. Como primer criterio de exclusión: artículos que no tratan directamente la temática del objetivo principal / secundarios o sí la tratan, pero utilizan técnicas de entrenamiento complementarias, como la “restricción del flujo sanguíneo”. El segundo criterio de exclusión: presentar un tamaño muestral muy pequeño con débil potencia estadística. Tercer criterio de exclusión: falta de claridad y poca precisión a la hora de explicar los criterios de inclusión / exclusión del estudio. Finalizando con el cuarto criterio de exclusión: resultados con baja significación o peso científico en base a la evidencia actual del tema.

3.4. Diagrama de flujo

Figura 1.

Diagrama de flujo de los artículos. Elaboración propia.



4. Resultados

4.1. Cuadro resumen de los artículos empleados

Figura 2.

Cuadro resumen de los 16 artículos consultados. Elaboración propia.

| AUTOR/ES Y AÑO | OBJETIVO/S | MUESTRA | VARIABLES | RESULTADOS | CONCLUSIONES |
|------------------------|--|--|--|---|---|
| Carroll et al. (2019). | Examinar las respuestas fisiológicas del músculo esquelético mediante un programa de intensidad relativa (RISR) o de repetición máxima (RM). Comprobar que un programa de RISR, evitando el fallo muscular, resulta en mayores ganancias hipertróficas y un mejor control de la fatiga muscular. | 18 hombres de $26,94 \pm 3,95$ años realizaron el estudio. Con experiencia en entrenamiento de fuerza de al menos 3 d. / semana con frecuencia de $7,7 \pm 4,2$ años mediante cuestionario. Asignación aleatorizada en 2 grupos, RISR (n = 7) utilizando el % de la mejor repetición de las series y RM (n = 8) donde se llevó hasta el fallo muscular al final de cada serie. | Biopsias musculares para analizar las fibras de tipo IIX, IIA y I, como las vías fisiológicas de diana de rapamicina en células de mamífero (mTOR) y proteína quinasa activada por adenina de monofosfato (AMPK). Se realizaron en reposo al menos 72h antes del inicio y 72h después de la última sesión del estudio. Ecografía musculoesquelética para evaluar el área de sección transversal anatómica (ACSA) y el grosor muscular (MT) del vasto lateral de la pierna derecha. | El tamaño muscular (CSA) de las fibras tipo I, II incrementó respecto al inicio de la intervención con significancia estadística para el grupo de RISR ($p \leq 0,05$). Respecto al ACSA y MT se encontró significancia estadística para el grupo RISR ($p \leq 0,05$), pero solo hubo significación en la variable MT para el grupo RM ($p \leq 0,05$). Los niveles de la vía mTOR total descendieron del pre-post estudio para el grupo RISR ($p = 0,031$) pero no para el grupo RM ($p = 0,08$). No se vieron efectos significativos para la vía AMPK ($p = 0,792$). | Mejor respuesta fisiológica para el ACSA de las fibras musculares y del grosor muscular general o MT, después de un programa de entrenamiento RISR evitando el fallo muscular respecto al entreno con RM llegando hasta la fatiga o fallo. Aumentó la hipertrofia muscular, lo que evidencia que la variación en la distribución de la carga con entrenos pesados y ligeros evitando el fallo tiene mejores resultados. Se apoya el uso del RISR en poblaciones entrenadas sobre el RM. |
| Fink et al. (2016). | Determinar si un protocolo de entrenamiento de resistencia llevado hasta el fallo muscular con cargas mixtas; induce a ganancias de masa muscular superiores respecto a los protocolos continuos con cargas altas o bajas. | 21 jóvenes gimnastas hombres sin experiencia en entrenamiento de fuerza. Asignados aleatoriamente al grupo H (3 series de 80% 1RM), grupo L (3 series de 30% 1RM) y al grupo M (cambio cada 2 semanas). | CSA muscular mediante resonancia magnética (IRM) de brazos entrenados y no entrenados; músculo bíceps, braquial y triceps en la semana previa al estudio y entre 72-96 h. post. a última sesión. Fuerza muscular mediante la contracción voluntaria máxima (MVC) y la producción de fuerza por unidad de tiempo (RFD) medidos en tiempo igual que el CSA. | El CSA de los flexores del codo no resultó en diferencias significativas entre grupos H: $9,1 \pm 6,4\%$ ($p = 0,001$), L: $9,4 \pm 5,3\%$ ($p = 0,001$) y M: $8,8 \pm 7,9\%$ ($p = 0,001$). La MVC isométrica de los flexores de codo en el grupo H presentó cambios significativos ($26,5 \pm 27\%$, $p = 0,028$), mientras que no hubo significación en el M ($11,8 \pm 36,4\%$, $p = 0,26$) ni en el L ($4,6 \pm 23,9\%$, $p = 0,65$). La RFD obtuvo mejoras significativas en el grupo H ($p = 0,049$) en la fase de 50-100 ms. | No existen diferencias significativas en ganancias de hipertrofia muscular para diferentes protocolos de cargas de entrenamiento, si la intensidad se lleva hasta el fallo/fatiga muscular en un período de 8 semanas en hombres jóvenes. El protocolo no lineal (mixto) no induce a mayores ganancias hipertróficas ni de fuerza comparándolo con el protocolo lineal (simple). |

| | | | | | |
|------------------------|--|--|---|---|--|
| Haun et al. (2017). | Comprobar si el entrenamiento de fuerza con cargas ligeras (30 %RM) o pesadas (80 %RM) hasta el fallo muscular, da como resultado adaptaciones musculoesqueléticas y neurales similares. Comparar ambas modalidades a nivel molecular, neuromuscular y en la recuperación postejercicio. | 15 jóvenes (edad: 22 ± 2 años y fuerza 1 RM en extensiones de pierna: 120 ± 28 kg) realizaron un diseño cruzado de 4 series de ejercicios de extensión de piernas al 30 %RM o al 80 %RM llegando al fallo de la repetición. Cambios 1 semana después. | Electromiografía de superficie (EMG) durante el ejercicio en vasto lateral izquierdo y biopsias del músculo vasto lateral al inicio (PRE), 15 min (15 min POST) y 90 min posterior al entreno (90 min POST). Para analizar respuestas moleculares y fibrilares. Dinamometría isocinética PRE, POST y 48 h después (48 h POST). | Mayor número de repeticiones en el "RE ligero" de 30 %RM ($p < 0.01$), la respuesta electromiografía (EMG) fue mayor durante la "RE pesado" de 80 %RM ($p \leq 0.01$), los valores de la dinamometría isocinética POST descendieron después de una RE ligera vs RE intensa ($p < 0.05$). Las respuestas moleculares postejercicio de mRNA y fosfoproteínas asociadas a la hipertrofia muscular dieron resultados similares. La fosforilación de la p70s6k y las fibras T.II (contracción rápida) se relacionaron en ambos RE ($r > 0.5$). | El "RE pesado" (80 %RM) fue más eficiente en base al menor número de repeticiones completadas hasta el fallo, su mayor amplitud EMG en relación con el "RE leve" (30 %RM) y a una mejor adaptación en la recuperación muscular en el tiempo. Se constata con estudios anteriores que la hipertrofia de las mio-fibras aumenta en función de la intensidad de entrenamiento en cargas por encima del 40%. |
| Jenkins et al. (2015). | Investigar la amplitud electromiografía (EMG AMP), la frecuencia de potencia media de EMG (MPF), el volumen de ejercicio (VOL), el trabajo total y la activación muscular (iEMG), el tiempo durante la carga en la acción concéntrica (TUCL) y el CSA muscular antes y después de 3 series al 80% vs 30% RM ejecutadas al fallo. | 9 hombres jóvenes (edad: $21 \pm 2,4$ años y post-semana de entrenamiento de fuerza de $6 \pm 3,7$ h) y 9 mujeres jóvenes (edad: $22,8 \pm 3,8$ años y post-semana de entrenamiento de fuerza de $3,4 \pm 3,5$ h) se sometieron a un diseño cruzado aleatorio. Realizaron la prueba 1RM, dos sesiones de extensión de piernas al 80 o 30% RM. | EMG para cuantificar EMG AMP y MPF en la repetición inicial, intermedia y última de las series (en recto femoral, vasto lateral e interno). Ultrasonido (US) para testar la CSA muscular antes y después del ejercicio. Cálculo del VOL, trabajo total, iEMG y TUCL. | EMG AMP superior al realizar las series al 80% vs 30% RM, un 147% y 74% respectivamente (en todas las series y repeticiones). EMG MPF descendió en ambas, pero bajó más al 30% RM (71,6 vs 78,1%). CSA muscular incrementó (hinchazón muscular) con el ejercicio al 30% RM (de 20,2 a 24,1 cm ²) y con el 80% RM (20,3 a 22,8 cm ²). El VOL, trabajo total, iEMG y TUCL fueron superiores (18-202%) en el trabajo realizado a 30% RM vs. 80% RM. | Mejor respuesta hipertrofica en la propuesta del 30 %RM (>fatiga), y del 80 %RM de cara a la fuerza llegando en ambas al fallo muscular. |
| Jenkins et al. (2017). | Establecer si 6 semanas de entrenamiento de resistencia (extensiones de piernas) de alta (80 %RM) y baja carga (30 %RM) hasta el fallo inducen a mejoras hipertroficas y de fuerza (dosis-respuesta). | 26 hombres jóvenes libres de lesiones musculoesqueléticas, sin práctica de entreno de fuerza en los últimos 6 meses (edad = $23,1 \pm 4,7$ años) asignados aleatoriamente a una carga alta (80 %RM, n = 13) o baja (30 %RM, n = 13), realizaron un entrenamiento de fuerza de extensiones de piernas al fallo x3 veces/semana (a lo largo de 6 semanas). | Pruebas al inicio, a las 3 y 6 semanas de entrenamiento. Evaluación del grosor muscular con US, fuerza 1RM, fuerza de contracción isométrica voluntaria máxima (MVIC) y las propiedades contráctiles del recto femoral. También el % de activación voluntaria (VA) y la amplitud electromiografía (EMG) se comprobaron durante la MVIC. | Incrementos similares en ambos grupos (80 y 30 %RM) en el grosor muscular desde el comienzo hasta la 3ª y 6ª semana. La fuerza (1RM) y la fuerza de la contracción isométrica voluntaria máxima (MVIC) incrementaron en mayor medida para el grupo del 80 %RM desde el comienzo hasta la 3ª y 6ª semana. El % de activación voluntaria (VA) durante la MVIC igualmente fue mayor en el grupo del 80 %RM en la semana 6. Solo el entreno al 80 %RM obtuvo significación en la amplitud de EMG en la MVIC. | 6 semanas de entrenamiento de fuerza de alta intensidad hasta el fallo con cargas altas (80 %RM) y bajas (30 %RM) repercutieron en mejoras hipertroficas. Entrenar al 80 %RM demostró mayores ganancias de fuerza, complementando bibliografía previa. Mejor adaptación neuronal y eficiencia en la activación muscular intra y post-entrenamiento de fuerza al 80% RM vs. 30 %RM. |

| | | | | | |
|----------------------------------|---|---|---|--|---|
| <p>Lacerda et al. (2021).</p> | <p>Comparar dos protocolos de entrenamiento de resistencia durante 14 semanas con diferente duración de la repetición (RD) ejecutados hasta el fallo muscular (MF) sobre las ganancias de fuerza e hipertrofia.</p> | <p>10 varones desentrenados se asignaron a uno de los 2 protocolos (RD de 2 o 6 s.) de ejercicio de extensión de rodilla unilateral. 3-4 series al 50-60 %RM al fallo. Diseño intra-sujeto.</p> | <p>Áreas transversales del recto femoral y vasto lateral (ACSA) con US, la contracción isométrica voluntaria máxima (MVIC) a 30° y 90° de flexión de rodilla y el 1RM pre y post entrenamiento. También la amplitud EMG.</p> | <p>Protocolo RD = 6 s. resultó en mayores ganancias en la MVIC 30°. Los incrementos en MVIC a 90°, 1RM, ACSA del femoral y vasto lateral no tuvieron significación en ningún protocolo. No diferencias significativas en amplitud EMG.</p> | <p>Los protocolos con diferentes RD ejecutados al MF provocaron ganancias hipertroficas similares, aun con diferencias en la amplitud EMG y en la fuerza-ángulo. Un mayor volumen con acciones rápidas al MF provocaría ganancias hipertroficas similares vs a TUT más altos con movimientos más lentos. La RD más prolongada es una mejor estrategia para las ganancias de fuerza muscular máxima isométrica en ejercicios desde la rodilla flexionada.</p> |
| <p>Lasevicius et al. (2018).</p> | <p>Contrastar diferentes intensidades de entrenamiento y evidenciar cuál de ellas demuestra una mejor significación para favorecer las ganancias de hipertrofia y fuerza muscular (en un entrenamiento de flexión de codo y prensa de piernas unilateral ejecutado hasta la fatiga muscular).</p> | <p>30 hombres jóvenes (edad: 24,5 ± 2,4 años) sin experiencia en entrenamiento realizaron un programa de entrenamiento de fuerza 2 veces/semana durante 12 semanas. Diseño intra-sujeto con pierna y brazo entrenado al 20 %RM (G20) y el contralateral al azar en una de estas condiciones: 40% (G40), 60% (G60) y 80% (G80).</p> | <p>El 1RM de la flexión de brazos unilateral y la prensa de piernas unilateral a 45°. También el ACSA del vasto lateral (VL) y flexores de codo (EF) fueron evaluados con US pre, post-6 semanas y post-12 semanas al entrenamiento.</p> | <p>Incrementos del ACSA en el VL (8,9%, 20,5%, 20,4% y 19,5%) y en los EF (11,5%, 25,3%, 25,1% y 25%) en G20, G40, G60 y G80 respectivamente (p > 0.05). G80 obtuvo un ACSA y EF más elevado que G20 para VL en las 12 semanas posteriores (p < 0.05). El entrenamiento al 60 y 80% RM tuvo mejores adaptaciones en el tiempo (post-12 semanas) que en grupos con %RM inferior (p < 0.05).</p> | <p>Intensidades de carga ejecutadas al fallo en un rango 20-80 (%RM), a un mismo volumen de entrenamiento, produjeron mejoras en la fuerza e hipertrofia (grosor muscular), salvo el 20 %RM que fue subóptimo, en hombres no entrenados. Únicamente la intensidad de carga al 80 %RM fue significativamente superior al resto para incrementar la fuerza muscular y el ACSA en comparación con intensidades más bajas. Durante las 6 primeras semanas todas las intensidades producen incrementos en 1RM.</p> |
| <p>Martorelli et al. (2017).</p> | <p>Determinar si el entrenamiento de resistencia con repeticiones hasta el fallo produce mejoras hipertroficas y en la fuerza neuromuscular en mujeres jóvenes activas.</p> | <p>89 mujeres jóvenes físicamente activas seleccionadas al azar mediante encuesta, (21 ± 3,3 años) que no habían realizado entrenamiento de fuerza regular en los 6 meses previos. 3 grupos: 1) repeticiones hasta el fallo (FR) x3 series, 2) repeticiones evitando el fallo con un mismo volumen (RNFV) = 4x7 reps. y 3) repeticiones evitando el fallo (RNF) = 3x7 reps. Ejercicio de flexión de codo bilateral x2 d. /semana (durante 10 sem.) al 70 %RM.</p> | <p>El 1RM o fuerza máxima de los flexores de codo (pre y post entreno; a las 5 y 10 semanas) con el curl de bíceps bilateral. El toque máximo de flexión unilateral de codo (PT) con 2x4 repeticiones concéntricas a 60° y a 280° con dinamómetro isocinético. Resistencia muscular con prueba de repeticiones hasta el fallo (70 %RM) pre. y post., como la fuerza. El grosor muscular (MT) pre. y post. con US.</p> | <p>Aumentó significativamente (p < 0.05) la fuerza muscular post. 5 (15,9% RF, 18,4% RNF y 19,9% RNFV) y 10 (28,3% RF, 26,8% RNF y 28,3% RNFV) semanas de entrenamiento sin diferencias entre grupos. La resistencia muscular también aumentó. El torque pico (PT) incrementó de forma significativa a 180° en grupos RNFV (13,7%) y RNF (4,1%) (p < 0.05), no hubo cambios en RF (- 0,5%). El grosor muscular ascendió significativamente (p < 0.05) en RF y RNFV post 5 (RF: 8,4% y RNFV: 2,3%) y 10 semanas (RF: 17,5% y RNFV: 8,5%), sin cambios significativos en RNF (3,9% y 2,1%).</p> | <p>Se evidenciaron mejoras en la fuerza 1RM del flexor de codo y resistencia muscular en mujeres jóvenes independientemente de la ejecución de repeticiones al fallo o del volumen de entrenamiento (igualado sin fallar o no). Mayor producción de fuerza en repeticiones submáximas (PT). Los grupos con mayor volumen total de repeticiones (RF y RNFV) desarrollaron más grosor muscular. La evidencia nos dice que para hipertrofiar el flexor del codo debe utilizarse un mayor volumen de trabajo total y que la fatiga o fallo no aporta beneficios extras a corto plazo.</p> |

| | | | | | |
|-------------------------|---|---|--|--|---|
| Mitchell et al. (2012). | Probar si el entrenamiento de resistencia es predictivo para aumentos agudos de síntesis de proteínas musculares (post-entreno), resultando en mejoras en la hipertrofia muscular (utilizando cargas bajas y altas ejecutadas hasta la fatiga muscular). | 18 hombres jóvenes ($21 \pm 0,8$ años) activos sin experiencia regular en entrenamiento de fuerza en el último año. Asignación de sus piernas al azar a diferentes cargas y volumen al 30 %RM x 3 series, 80 %RM x 1 series y 80 %RM x 3 series ejecutadas hasta el éxtasis muscular (3 veces/semana). | El 1RM o fuerza máxima antes y después de entrenamiento (aleatorización). El volumen muscular (CSA) mediante resonancia magnética y biopsias del vasto lateral (antes y después) + biopsia postejercicio (1h.) después de la primera serie para medir la señalización de proteínas. La contracción isométrica voluntaria máxima (MVIC), el desarrollo de la fuerza isométrica (RFD) y la potencia máxima mediante un dinamómetro al realizar extensiones de rodillas dinámicas submáximas. | Después de 10 semanas de entrenamiento el volumen de cuádriceps (CSA) aumentó en todos los grupos (30% x 3: $6,8 \pm 1,8\%$, 80% x 1: $3,2 \pm 0,8\%$ y 80% x 3: $7,2 \pm 1,9\%$) ($p < 0.001$). Las fibras musculares T-I y II aumentaron sin diferencias significativas entre grupos ($p < 0.05$). Las ganancias de 1RM no fueron diferentes entre 80% x 1 y 80% x 3, pero fueron mayores que en 30% x 3 ($p = 0.04$). La fuerza MVIC, potencia máx., RFD de extensión de rodilla aumentaron en todos los grupos sin diferencias entre ellos. Aumento de la fosforilación de p70S6K en condiciones de 80% x1 y 80% x3. | La hipertrofia muscular es similar si el entrenamiento de fuerza se realiza con cargas más altas (80 %RM) o más bajas (30 %RM) si se lleva hasta el fallo muscular en levantadores novatos. Además, el volumen de entrenamiento es una variable dependiente de mayor hipertrofia muscular (> series). Aumentos agudos de MPS post-entreno se relacionan con ganancia de proteína muscular. |
| Morton et al. (2019). | Determinar que efectos tiene el entrenamiento de resistencia hasta el fallo muscular con cargas pesadas vs. ligeras, con duración variable de la repetición (más cortas o largas "TUT"). | 10 hombres jóvenes que practican entrenamiento de fuerza recreativo (22 ± 3 años), 1 a 3 sesiones/semana durante 2 años. Aleatorización cruzada de las piernas para 4 protocolos unilaterales de extensión de rodilla; 80% RM regular (1:1:1), 80% RM slow (3:1:3), 30% RM regular (1:1:1) y 30% RM slow (3:1:3). X3 series hasta el fallo muscular. | En los 2 días del estudio; biopsia muscular del vasto lateral (pre.). Cálculo del MVE (pre.) para cuádriceps e isquiotibiales (flexiones y extensiones de rodillas a 60° y 40° respectivamente). 1h después del entreno se toma biopsia del VL en cada pierna (glucógeno muscular y tipo fibras + CSA). EMG durante el ejercicio. | Biopsias de músculo vasto lateral pre. y 1h. post al entreno de fuerza (sin significación entre las cargas; CSA). El TUT, número de repeticiones, volumen total, amplitud de EMG (inicio y fin de cada serie) y EMG total tuvieron significación diferente entre las cargas ($p < 0.05$). El agotamiento de glucógeno (Fibras TI y II) ni la fosforilación de las proteínas de señalización tuvieron diferencias entre las cargas. | El entrenamiento de fuerza con cargas más altas o bajas, si estas se llevan hasta el fallo muscular produce resultados hipertroáficos similares en las fibras de T-I y II (activación equivalente). La activación de las fibras y la post-señalización anabólica son independientes de la carga, TUT y amplitud de EMG si la tarea es llevada al fallo muscular. La duración variable convencional (1:1:1) vs. más larga (3:1:3) no presentó diferencias significativas en el agotamiento de glucógeno de las fibras. |
| Morton et al. (2016). | Comprobar si el entrenamiento de resistencia unilateral con cargas altas o bajas (con diferente número de repeticiones) llevado hasta el fallo muscular, propiciaba en mejoras hipertroóficas y de fuerza en sujetos con experiencia. Examinar si las hormonas sistémicas posteriores al ejercicio presentaban relación con cambios en la hipertrofia y fuerza. | 49 hombres con experiencia en entrenamiento de fuerza (23 ± 1 año) realizaron 12 semanas de Fullbody. Asignación aleatoria a un grupo de mayor número de repeticiones de 20-25 (HR) con carga de 30-50% RM ($n = 24$) o un grupo de menor número de repeticiones de 8-12 (LR) con carga de 75-90% RM, llegando al fallo muscular. | Biopsia ME, prueba de 1RM, absorciometría de rayos X (DEXA para densidad mineral ósea, composición corporal – BMD) y variaciones en concentraciones hormonales sistémicas pre-post. entrenamiento (muestras de sangre). | La fuerza 1RM incrementó en todos los ejercicios de ambos grupos ($p < 0.01$), solo en el press banca tuvo significación diferente entre grupos (HR: 9 ± 1 kg vs. LR: 14 ± 1 kg, $p = 0.012$). La masa corporal libre de grasa (magra) y el CSA de las fibras T-I y II aumentó post entrenamiento ($p < 0.01$) sin diferencias significativas entre grupos. No existieron correlaciones significativas entre el aumento agudo hormonal post ejercicio y una mayor fuerza o hipertrofia. | Los aumentos hormonales sistémicos agudos no presentan relación cambios en las ganancias de masa o fuerza muscular. Ejercicios llevados hasta el fallo muscular con diferentes tipos de carga y repeticiones (altas y bajas) provocan unas respuestas similares en masa libre de grasa o hipertrofia, como de fuerza muscular. |

| | | | | | |
|-----------------------------------|---|--|---|---|---|
| <p>Sampson y Groeller (2016).</p> | <p>Determinar que efectos presenta el entrenamiento de resistencia al fallo para desarrollar la hipertrofia y fuerza muscular en los músculos flexores de codo.</p> | <p>28 hombres que no habían realizado entrenamiento de fuerza en los últimos 6 meses. Los más respondedores y menos respondedores al periodo de familiarización de 4 semanas (pre.) de flexiones resistidas unilaterales hasta el fallo se distribuyeron de manera uniforme en 3 condiciones; A) RS (n=10) - Concéntrico rápido y 2 s. excéntrico sin fallo al 85 %RM, B) SSC (n=8) – concéntrico rápido y excéntrico rápido sin fallo al 85 %RM y C) Control (n=10) – 2 s. concéntrico y 2 s. excéntrico al fallo x 3 veces/semana.</p> | <p>1RM en flexores de codo, la contracción voluntaria máxima isométrica (MVIC), el CSA de los flexores con MRI y la activación de agonista-antagonista mediante EMG; antes de comenzar el entrenamiento de 12 semanas (inicio semana 1), en la 4ª, 8ª y al finalizar (fin semana 12).</p> | <p>Aumento significativo en el 1RM (30,5%) (P < 0.001), MVIC (13,3%), CSA (11,4%) y EMG agonista (22,1%) sin detectarse diferencias entre grupos. La actividad EMG antagonista aumentó significativamente en grupo "ciclo estiramiento-acortamiento" - SSC (40,5%) y "control" - C (23,3%), pero bajó en grupo "acortamiento rápido" - RS (13,5%).</p> | <p>El entrenamiento de fuerza evitando el fallo (volumen reducido) produce ganancias similares en la fuerza, activación muscular y CSA vs. si se ejecuta hasta el fallo (volumen superior). La activación muscular rápida mediante acciones conc-exc., parece ser que iguala ambos tipos de entrenamiento. El fallo en la repetición no es un punto crítico para inducir cambios en la fuerza e hipertrofia muscular.</p> |
| <p>Santaniello et al. (2020).</p> | <p>Comparar que efecto tiene el entrenamiento de resistencia llevado hasta el fallo muscular (RT-F) vs. evitar el fallo (RT-NF) sobre las ganancias de masa, fuerza y activación muscular en población entrenada.</p> | <p>Diseño intra-sujeto con 14 hombres con experiencia en entrenamiento de fuerza (edad: 23 ± 2,2 años). Experiencia de entreno con miembros inferiores a frecuencia de 2 veces/semana en los 2 años previos, con ejercicios de prensa piernas 45° y extensión de piernas en sus rutinas (no toma de esteroides anabólicos en el último año). 1 pierna asignada al azar a RT-F y otra a RT-NF (entreno 2 d. /semana durante 10 semanas).</p> | <p>El CSA del VL, el ángulo de penetración (PA), la longitud del fascículo (FL) con US y el 1RM se testaron al inicio del estudio (pre) y post de las 20 sesiones. La activación muscular con EMG se evaluó post.</p> | <p>En ambos protocolos hubo aumentos similares y con significación en CSA (RT-F: 13,5% y RT-NF: 18,1%; p< 0.0001), PA (RT-F: 13,7% y RT-NF: 14,4%; p< 0.001) y FL (RT-F: 11,8% y RT-NF: 8,6%; p< 0.0001). También en la prensa de piernas (RT-F: 22,3% y RT-NF: 26,7%; p< 0.0001) y extensión de piernas (RT-F: 33,3%, p< 0.0001 y RT-NF: 33,7%; p< 0.0001) hubo aumentos similares y significativos del 1RM. No existieron diferencias significativas en la amplitud de EMG (p> 0.05) entre grupos.</p> | <p>RT-F y RT-NF tienen la misma efectividad de cara a ganar masa muscular (hipertrofia muscular), fuerza y activación muscular en las fibras T-I y II en individuos entrenados.</p> |
| <p>Stefanaki et al. (2019).</p> | <p>Comparar la efectividad del fallo muscular con cargas bajas (30 %RM) o altas (80 %RM) sobre las ganancias hipertróficas y de fuerza, en mujeres jóvenes sometidas a un entrenamiento de fuerza de 6 semanas.</p> | <p>13 mujeres (edad: 29,7 ± 4,7 años) realizaron 2 sesiones a la semana durante 6 semanas. Entrenamiento de 1 serie al fallo de extensiones de pierna unilaterales + flexiones de bíceps con cada extremidad mediante asignación al azar al 80 o 30 %RM.</p> | <p>Fuerza máxima con 1 RM del extensor de rodilla y flexor de codo, grosor muscular del VL y bíceps braquial (BB) con US y composición corporal con pletismografía de desplazamiento de aire (BodPod). 3 y 4 días antes del inicio del entrenamiento y del final de este.</p> | <p>Aumento del grosor muscular en brazos (6,81 ± 3,15% al 30 %RM, 5,90 ± 3,13% al 80 %RM) y piernas (9,37 ± 5,61% al 30 %RM, 9,13 ± 7,9% al 80 %RM). Aumento de la fuerza en brazos (15,4 ± 12,2% al 30 %RM, 18,26 ± 12,2% al 80 %RM) y piernas (25,30 ± 18,4 al 30 %RM, 27,20 ± 14,5 al 80 %RM). No existieron diferencias significativas entre las cargas.</p> | <p>En mujeres cuando se realiza un ejercicio hasta el fallo muscular, la carga no determina la magnitud de las respuestas adaptativas hipertróficas o de fuerza muscular.</p> |

| | | | | | |
|-------------------------------|---|--|--|---|---|
| <p>Stock et al. (2017).</p> | <p>Examinar el proceso hipertrófico en un margen temporal de 4 semanas de entrenamiento de resistencia concéntrico, llevado al fallo muscular en hombres no entrenados.</p> | <p>13 hombres sin experiencia en entrenamiento realizaron flexiones con mancuerna unilateral de manera concéntrica y press de hombro x2 veces/semana, durante 4 semanas. Series de 8-12 reps hasta el fallo muscular con aumento de la carga intra-sesión.</p> | <p>Evaluación de dolor, masa libre de grasa, grosor muscular, intensidad de eco, circunferencia de brazo relajado y flexionado y fuerza isocinética cada 24-48h post sesión de cada entreno.</p> | <p>El dolor, la intensidad del eco, circunferencia relajada y pico de torque no cambiaron de manera significativa. Hubo aumentos significativos en masa libre de grasa, grosor muscular y circunferencia flexionada al realizar 7 sesiones de entreno.</p> | <p>En las personas que inician un programa de entrenamiento de fuerza concéntrico con objetivos hipertróficos, que es llevado hasta la fatiga muscular, pueden existir ganancias musculares leves a las 4 semanas (en ausencia de daño muscular excéntrico).</p> |
| <p>Teodoro et al. (2019).</p> | <p>Comparar las adaptaciones neuromusculares y en la función a largo plazo (20 sem.) después de un entrenamiento concurrente, realizando repeticiones hasta el fallo vs. no fallo en hombres mayores.</p> | <p>36 hombres mayores (67,1 ± 5,1 años) se sometieron a una aleatorización en 3 grupos: 1) Repeticiones al fallo (RFG, n = 13), 2) repeticiones sin fallo y el 50% de las repeticiones del RFG (NFG, n = 12), 3) repeticiones sin fallar a mismo volumen de entreno del RFG (ENFG, n = 11). 20 semanas de entrenamiento concurrente.</p> | <p>1RM en prensa de piernas (LP) y extensión de rodilla (KE). Torque pico isométrico de extensores de rodilla (PTiso), tasa de desarrollo de torque (RTD) a 50ms, 10ms y 250ms (dinamómetro isocinético), grosor muscular del cuádriceps (ecografía) y rendimiento funcional en sit-to-stand y test cronometrado. Pre y post protocolo de entreno.</p> | <p>Aumentos significativos (p< 0.001) en resultados de LP y KE en 1RM, PTiso y RTD en todos los grupos. Incrementos en grosor muscular del cuádriceps y en sit-to-stand (p< 0.05) en todos los grupos. No hubo diferencias significativas entre grupos.</p> | <p>El entrenamiento concurrente con trabajo de fuerza hasta el fallo muscular concéntrico no tuvo beneficios adicionales en la función, tamaño muscular, 1RM y fuerza explosiva en personas mayores. El realizar el 50% de las repeticiones posibles optimizó el rendimiento neuromuscular, la hipertrofia y la capacidad funcional a las 20 semanas.</p> |

4.2. **Resumen artículos empleados**

En el reciente estudio controlado aleatorio (ECA) de Carroll et al. (2019) examinaron las respuestas fisiológicas de la musculatura esquelética (ME) a través de un plan de entrenamiento de intensidad relativa (RISR) o de repetición máxima (RM). Querían comprobar que un programa de RISR, que supone no llegar hasta el fallo muscular, promovía mayores ganancias hipertróficas y un mejor control de la fatiga muscular. Para ello, reclutaron a 18 hombres ($26,94 \pm 3,95$ años) con experiencia en entrenamiento de fuerza (3 días por semana y frecuencia de $7,7 \pm 4,2$ años) mediante cuestionario. Se realizó una asignación aleatorizada en 2 grupos; el RISR ($n = 7$), donde se tuvo en cuenta el % de la mejor repetición de todas las series y el RM ($n = 8$). Realizaron repeticiones hasta el fallo muscular en cada serie durante 10 semanas. Se recogieron biopsias musculares en ambos grupos para analizar las fibras tipo IIX, IIA y I, las vías fisiológicas de “diana de rapamicina células de mamífero” (mTOR) y la proteína quinasa activada por adenina de monofosfato (AMPK). También se evaluó el área de sección transversal anatómica (ACSA) mediante ecografía ME y el grosor muscular (MT) del vasto lateral de la pierna derecha. Estas se realizaron previo al inicio del estudio (72 h. pre.) y después de la última sesión (72 h. post.). Las pruebas dieron como resultado un incremento del ACSA en las fibras tipo I y II respecto al inicio, con significancia estadística para el RISR ($p \leq 0.05$); con solo significación en la MT para el grupo RM ($p \leq 0.05$). Los niveles de mTOR descendieron en el RISR ($p = 0.031$), a diferencia del grupo RM ($p = 0.08$). Se observó una mejor respuesta anatómica y fisiológica a nivel fibrilar, ACSA y MT después de un plan de entrenamiento RISR (sin buscar el fallo muscular); respecto al RM, involucrando el fallo. El aumento de la hipertrofia muscular esclarece: la variación en la distribución de la carga con entrenos pesados y ligeros sin llegar al fallo obtiene mejores ganancias físicas, apoyando el uso de RISR en población entrenada (Carroll et al., 2019).

Previamente, Fink et al. (2016) quisieron determinar si un protocolo de entrenamiento (ECA) llevado hasta el éxtasis muscular con cargas mixtas (bajas y altas) inducía en mayores ganancias de masa muscular respecto a protocolos continuos, sin variar la carga. Para ello, 21 varones jóvenes (gimnastas) sin

experiencia en entrenamiento de fuerza fueron asignados aleatoriamente en 3 grupos: H (3 series al 80% RM), L (3 series al 30% RM) y M (cambio cada 2 semanas). Se midió el ACSA con resonancia magnética (IRM) en los brazos entrenados y no entrenados (bíceps, braquial y tríceps) en la semana previa al estudio (72 h. pre.), como posterior a la última sesión (72-96 h. post.). También, la fuerza muscular mediante la contracción máxima voluntaria (MVC) y la producción de fuerza por unidad de tiempo (RFD) con un dinamómetro isocinético. El ACSA de los flexores de codo no presentó diferencias significativas entre grupos; H: $9,1 \pm 6,4\%$ ($p = 0.001$), L: $9,4 \pm 5,3\%$ ($p = 0.001$) y M: $8,8 \pm 7,9\%$ ($p = 0.001$). La MVC isométrica de los flexores de codo en el grupo H presentó cambios significativos ($26,5 \pm 27\%$, $p = 0.028$), mientras que no existió significación en el M ($11,8 \pm 36,4\%$, $p = 0.26$) ni en el L ($4,6 \pm 23,9\%$, $p = 0.65$). La RFD también mejoró significativamente en el grupo H ($p = 0.049$) en la fase de 50-100 ms. Se estableció, que no existen diferencias significativas en ganancias hipertróficas con diferentes protocolos de carga si la intensidad (% RM) se lleva hasta la fatiga o fallo muscular; en un corto período de 8 semanas. Por ello, el protocolo no lineal (mixto) no se debe recomendar como método "Gold Standard" (Fink et al., 2016).

Un año después, Haun et al. (2017) volvieron a comprobar mediante un estudio cruzado, si un entrenamiento de fuerza con cargas ligeras (30 %RM) o pesadas (80 %RM) llevado hasta el fallo muscular, resultaba en adaptaciones ME y neurales similares. Se analizaron las respuestas a nivel molecular, neuromuscular (NM) y de recuperación post-ejercicio. 15 jóvenes (22 ± 2 años y fuerza 1RM en extensiones de pierna: 120 ± 28 kg) fueron sometidos a un diseño cruzado (cambio a la semana) de 4 series de ejercicios con patrón extensor de pierna al 30 %RM o 80 %RM, llegando al fallo muscular. La activación muscular se midió con electromiografía de superficie (EMG) en el vasto lateral izquierdo durante el ejercicio. Las biopsias se recogieron al inicio (PRE), 15 min. post. (15 min. POST) y 90 min. post (90 min. POST). Por último, la fuerza con dinamómetro isocinético PRE, POST y 48 h. POST. Se obtuvo un mayor número de repeticiones al 30 %RM ($p < 0.01$), la respuesta EMG fue mayor al 80 %RM ($p \leq 0.01$) y los valores en la dinamometría isocinética POST descendieron después de una "RE ligera" vs. "RE intensa" ($p < 0.05$). Las respuestas a nivel molecular del mRNA y fosfoproteínas asociadas a la

hipertrofia fueron similares, como la fosforilación de la p70s6k y las fibras T-II (contracción rápida) ($r > 0.5$). El "RE pesado" al 80% RM fue más eficiente, suponiendo un menor número de repeticiones hasta el fallo muscular, una mayor amplitud EMG y una mejor recuperación en el tiempo. Se contrastó con estudios previos: la hipertrofia miofibrilar incrementa en función de la intensidad, en cargas por encima del 40% RM (Haun et al., 2017).

Anteriormente, en el estudio cruzado aleatorio de Jenkins et al. (2015) se quiso investigar en el cuádriceps: la amplitud EMG, la frecuencia de potencia media de EMG (MPF), el volumen de ejercicio (VOL), el trabajo total, la activación muscular (iEMG), el tiempo durante la carga en la acción concéntrica (TUCL) y el ACSA muscular (con ultrasonido – US); antes y después de 3 series al 80% o al 30% RM, realizadas hasta el fallo. Reclutaron 9 varones ($21 \pm 2,4$ años) y mujeres ($22,8 \pm 3,8$ años) jóvenes a los que sometieron a una aleatorización cruzada después de una semana de entrenamiento de fuerza de $6 \pm 3,7$ h. y $3,4 \pm 3,5$ h. respectivamente (donde realizaron la prueba 1 RM). Ejecutaron 2 sesiones de extensión de piernas al 80% o 30% RM, resultando en una amplitud EMG superior en las series al 80%, concretamente un 147% respecto al 74%, contando todas las series y repeticiones. La MPF descendió en ambas, pero disminuyó en mayor medida al 30% RM (71,6 vs. 78,1 %). El ACSA muscular incrementó con el ejercicio al 30% RM (de 20,2 a 24,1 cm²) y con el 80% RM (20,3 a 22,8 cm²). También, el VOL, trabajo total, iEMG y TUCL fueron superiores (10-202%) en el trabajo al 30% RM vs. 80% RM. Existió una mejor respuesta hipertrófica en la propuesta del 30% RM (> fatiga) e incrementó la fuerza para el protocolo 80% RM (llegando ambas hasta el fallo muscular) (Jenkins et al., 2015).

Dos años después, también Jenkins et al. (2017) compararon en un estudio controlado aleatorio de 6 semanas (paralelo y de medidas repetidas) un protocolo al 80 %RM (carga elevada) respecto a uno al 30% RM (carga baja). En ambos se buscó el fallo muscular, para analizar si inducían a una mejor respuesta hipertrófica y de fuerza (dosis-respuesta). 26 varones jóvenes ($21,1 \pm 4,7$ años) sin práctica de entrenamiento de fuerza en los últimos 6 meses, fueron asignados aleatoriamente a uno de los dos grupos (80% RM, $n = 13$ y 30% RM, $n = 13$). Realizaron extensiones de piernas hasta el fallo, 3 veces a la semana. Se evaluaron el MT con

US, la fuerza 1 RM, la MVIC, el % de activación voluntaria (VA) y la amplitud EMG (al inicio, 3ª y 6ª semana). Se evidenciaron incrementos similares en ambos grupos en el MT de forma progresiva. La fuerza 1 RM y la MVIC fueron superiores en el grupo del 80% RM, desde el inicio. El VA durante la MVIC también incrementó en el 80% RM, en la 6ª semana. Solo el entreno al 80% RM obtuvo significación estadística en la amplitud EMG, durante la MVIC. Tras 6 semanas de entrenamiento de fuerza a alta intensidad (fallo muscular) con cargas altas (80% RM) y bajas (30% RM), se alcanzaron mejoras hipertróficas. El entreno al 80% RM demostró mayores ganancias de fuerza (respaldando estudios previos), debido a una mejor adaptación neuronal y eficiencia muscular (activación) intra y post-entrenamiento (Jenkins et al., 2017).

En el reciente estudio intra-sujeto de 2021, Lacerda et al. (2021) compararon 2 protocolos de entrenamiento de resistencia con diferente duración de la repetición (RD), durante 14 semanas. Fueron realizados hasta el fallo muscular (MF), para comprobar si una mayor intensidad promovía cambios en la fuerza e hipertrofia muscular. 10 varones jóvenes (entre 18-30 años) desentrenados fueron asignados al grupo RD 2 s. o al RD 6 s. Realizaron extensiones de rodilla unilaterales (3-4 series al 50-60% RM hasta el fallo). Se midieron el ACSA del recto femoral (RF) y vasto lateral (VL) con US. La MVIC a 30° y 90° de flexión de rodilla con dinamómetro isocinético, la amplitud EMG y el 1 RM pre-post. estudio. El protocolo RD 6 s. obtuvo mayores ganancias en la MVIC a 30°. Sin embargo, los incrementos en la MVIC a 90°, 1 RM, amplitud EMG, ACSA del recto y vasto lateral, no tuvieron significación en ningún protocolo. Ambos RD realizados hasta el MF provocaron incrementos hipertróficos similares: un mayor volumen con acciones rápidas (2 s.) genera la misma hipertrofia vs. a TUT's ("Time Under Tensión") más altos (6 s.) con movimientos más lentos. La RD prolongada (6 s.) es la mejor estrategia, de cara a las ganancias de fuerza máxima isométrica (por su > MVIC) (Lacerda et al., 2021).

Lasevicius et al. (2018) contrastaron diferentes intensidades en un entrenamiento de flexiones de codo y prensa de piernas unilateral (45°) llevado hasta el fallo, para evidenciar cual era la mejor alternativa de cara a maximizar la hipertrofia y la fuerza muscular. 30 varones jóvenes (24,5 ± 2,4 años) sin experiencia entrenaron 2 veces a la semana, durante 12 semanas. Con un diseño intra-sujeto, se asignaron la

pierna y brazo entrenados a una intensidad del 20% RM (G 20). El contralateral al azar en una de las siguientes condiciones: 40% RM (G40), 60% RM (G60) y 80% RM (G80). Se calculó el 1 RM de ambos ejercicios, igualmente el ACSA del VL y de los flexores de codo (EF), mediante US pre., post. 6 y 12 semanas al inicio del programa. Los resultados mostraron claridad en el ACSA del VL, con incrementos del 8,9%, 20,5%, 20,4% y 19,5% y del EF en un 11,5%, 25,3%, 25,1%, 25% (G20, G40, G60 y G80 respectivamente) ($p > 0.05$). G80 obtuvo un ACSA y EF superior que G20 para VL, en las 12 semanas posteriores ($p < 0.05$). El entrenamiento al 60% y 80% RM resultó en una mejor adaptación física en el tiempo (post-12 semanas), respecto a grupos con un % RM inferior ($p < 0,05$). Las intensidades de carga ejecutadas hasta el fallo en un rango de 20-80 (% RM), con un mismo volumen de entrenamiento produjeron mejoras en la fuerza e hipertrofia; salvo el 20% RM, siendo subóptimo. La carga al 80 %RM presentó significación estadística para la fuerza muscular y el ACSA, en comparación con intensidades menores. Durante las 6 primeras semanas, todas las intensidades favorecieron el 1 RM (Lasevicius et al., 2018).

Martorelli et al. (2017) buscaron determinar si el entrenamiento de resistencia (con repeticiones hasta el fallo muscular), producía mejoras en la hipertrofia y fuerza neuromuscular, en mujeres jóvenes activas. Para ello seleccionaron a 89 mujeres al azar ($21 \pm 3,3$ años), que no habían realizado un programa de fuerza regular en los 6 meses previos. En este estudio experimental se aleatorizó en 3 grupos a los participantes (ejecutaron flexiones de codo bilateral, 2 días a la semana al 70% RM, durante 10 semanas): 1) 3 series de repeticiones hasta el fallo (FR), 2) repeticiones sin llegar al fallo con un mismo volumen que el G.1 (RNFV) = 4×7 reps., 3) repeticiones sin llegar al fallo (RNF) = 3×7 reps. Se midió la fuerza 1 RM de los flexores de codo (pre-post entreno; a las 5 y 10 semanas), con el Curl de bíceps bilateral. También, el torque máximo de flexión unilateral de codo (PT) con 2×4 reps. concéntricas a 60° y a 280° , con dinamómetro isocinético. Por último, la resistencia muscular con una prueba de repeticiones hasta el fallo (70% RM) y el MT, con US (pre-post.). Existieron aumentos significativos ($p < 0.05$) en la resistencia muscular post. 5 (15,9% RF, 18,4% RNF y 19,9% RNFV) y 10 (28,3% RF, 26,8% RNF y 28,3% RNFV) semanas de entrenamiento, sin diferencias entre grupos. El PT

incrementó significativamente a 180° en grupos RNFV (13,7%) y RNF (4,1%) ($p < 0.05$), sin cambios en RF (-0.5%). El MT aumentó en RF y RNFV ($p < 0.05$) post. 5 (RF: 8,4% y RNFV: 2,3%) y 10 semanas (RF: 17,5% y RNFV: 8,5%), sin cambios en RNF (3,9% y 2,1% respectivamente). La fuerza 1 RM y la resistencia muscular de los flexores de codo, mejoró independientemente del fallo muscular o volumen total. El PT fue superior con repeticiones submáximas. Los grupos con mayor volumen (RF y RNFV), desarrollaron mayor MT. La evidencia respalda un mayor volumen de trabajo para maximizar la hipertrofia; la fatiga o el fallo muscular no aportan beneficios extra en el corto plazo (Martorelli et al., 2017).

Hace casi una década Mitchell et al. (2012) probaron si el entrenamiento de resistencia predecía aumentos agudos (post-entreno) en la síntesis de proteínas musculares, pudiendo dar como resultando mejoras hipertróficas. Se utilizaron cargas bajas y altas llevadas hasta la fatiga muscular. 18 varones jóvenes ($21 \pm 0,8$ años) activos que no practicaron entrenamiento de fuerza de manera regular en el último año, realizaron extensiones de rodilla unilaterales. Fueron asignados mediante aleatorización (ECA) a diferentes cargas y volumen: 1) 30% RM x 3 series, 2) 80% RM x 1 serie y 3) 80% RM x 3 series (repeticiones hasta el fallo muscular), 3 veces por semana. Se midieron la fuerza 1 RM, el ACSA con IRM y biopsias (señalización proteica) del VL, antes y después del entrenamiento. Además de la MVIC, RFD y potencia máxima, con dinamómetro. El ACSA del cuádriceps aumentó en todos los grupos: 30% x 3: $6,8 \pm 1,8\%$, 80% x 1: $3,2 \pm 0,8\%$ y 80% x 3: $7,2 \pm 1,9\%$ ($p < 0.001$). Las fibras T-I y II incrementaron su área, sin diferencias significativas entre grupos ($p < 0.05$). Las ganancias de 1 RM no variaron entre el G.2 y el G.3, siendo ambas mayores al G.1 ($p = 0.04$). La MVIC, potencia max. y RFD mejoraron en todos los grupos, sin significación entre ellos. La fosforilación de p70S6K aumentó en el G.2 y G.3. La hipertrofia muscular no varía, si se realiza un entrenamiento de fuerza hasta el fallo con cargas altas (80% RM) o bajas (30% RM) en levantadores noveles. Siendo el volumen de entrenamiento la variable dependiente de mayor hipertrofia (> series = > ganancias). Los aumentos agudos de MPS post-entreno, se relacionaron con ganancias de proteína muscular (Mitchell et al., 2012).

En línea con el estudio anterior, años después, Morton et al. (2019) determinaron que efectos tiene el entrenamiento de resistencia (sobre las fibras musculares) aplicado hasta el fallo muscular; tanto con cargas pesadas y livianas. También, tuvieron en cuenta la duración de cada repetición "TUT" (diferenciando cortas y largas). 10 varones jóvenes (22 ± 3 años) con experiencia en entrenamiento de fuerza recreativo, (1 a 3 sesiones semanales durante 2 años) se dividieron mediante aleatorización cruzada (ECA), a 4 protocolos de extensión de rodilla unilateral: 1) 80% RM "Regular" (1:1:1), 80% RM "Slow" (3:1:3), 30% RM "Regular" (1:1:1) y 30% RM "Slow" (3:1:3), x 3 series hasta el fallo muscular. En los 2 días de estudio se realizaron biopsias musculares del VL a trabajar (pre.) y del contralateral (1 h. post.); midiendo el glucógeno, tipo de fibras y ACSA. Se calculó la excitación voluntaria máxima (MVE) con EMG, en cuádriceps e isquiotibiales (flexiones y extensiones de rodilla a 60 y 40° respectivamente). No presentaron significación estadística las biopsias (agotamiento glucogénico, ACSA, tipo de fibras y fosforilación proteica), realizadas entre las diferentes cargas. El TUT, número de repeticiones, volumen total, amplitud de EMG (al inicio y fin de cada serie) y EMG total, obtuvieron significación diferente entre las cargas ($p < 0.05$). El fallo muscular con cargas altas y bajas presenta la misma efectividad a nivel hipertrófico, en las fibras T.I y II (activación y desarrollo). La activación fibrilar y la post-señalización anabólica son independientes de la carga, TUT y amplitud EMG, si la tarea alcanza el fallo muscular. Las repeticiones clásicas con duración "regular" (1:1:1) no son más efectivas que las más largas "Slow" (3:1:3), teniendo en cuenta el nivel glucolítico de las fibras (Morton et al., 2019).

Previamente Morton et al. (2016) investigaron si un entrenamiento "Full Body" unilateral con cargas altas o bajas (variando el número de repeticiones), llevado hasta el fallo muscular, propiciaba mejoras hipertróficas y de fuerza, en sujetos con experiencia. También, si existía una relación entre las hormonas sistémicas post-ejercicio y la fuerza e hipertrofia. 49 varones jóvenes (23 ± 1 año) con experiencia en entrenamiento de fuerza, fueron asignados al azar (ECA) en 2 grupos: 1) mayor número de repeticiones (20-25 HR) al 30-50% RM ($n = 24$) y 2) menor número de repeticiones (8-12 LR) al 75-90% RM ($n = 25$). Se les realizaron biopsias ME, absorciometría de rayos X (DEXA) (para el análisis de su densidad mineral ósea -

BMD y composición corporal), y la prueba 1 RM. Además, se calcularon las variaciones en la concentración hormonal sistémica pre-post. entreno, mediante muestras sanguíneas. La fuerza 1 RM incrementó en todos los ejercicios de ambos grupos ($p < 0.01$), solo el press de banca tuvo diferente significación (HR: 9 ± 1 kg vs. LR: 14 ± 1 kg, $p = 0.012$). La masa corporal libre de grasa (magra) y el ACSA de las fibras T.I y II aumentaron post-entreno ($p < 0.01$), sin diferencias significativas entre grupos. Tampoco existió correlación entre las ganancias de fuerza-hipertrofia y el incremento hormonal agudo, post-ejercicio. Por ello, las hormonas sistémicas no guardan relación con cambios neurales y musculares. Aplicar en un entrenamiento el fallo muscular, provoca unas respuestas anabólicas (masa libre de grasa y neurales) similares entre diferentes cargas (30-90% RM) y repeticiones (8-25) (Morton et al., 2016).

Sampson y Groeller (2016) se preguntaron si llegar hasta el fallo muscular en cada serie, podía resultar más beneficioso, para inducir ganancias de fuerza e hipertrofia vs. no realizarlo (en sujetos con 6 meses de desentrenamiento). 28 varones se sometieron a un estudio experimental (ECA); después de un período de adaptación de 4 semanas, realizando flexiones de codo unilaterales (2:1:2). Incrementando la carga un 10% cada semana (partiendo de un 50% RM), se distribuyeron uniformemente en 3 condiciones: 1) "Acortamiento rápido sin fallo" (RS) ($n = 10$) - fase concéntrica rápida y excéntrica de 2 s. al 85% RM, sin llegar al fallo, 2) "ciclo acortamiento-estiramiento sin fallo" (SSC) ($n = 8$) - fase concéntrica y excéntrica rápidas al 85% RM, sin llegar al fallo y 3) "control con fallo" (C) ($n = 10$) - fase concéntrica y excéntrica de 2 s. llegando al fallo muscular, x 3 veces por semana. Se analizaron el 1 RM, la MVIC, el ACSA (con MRI) y la activación muscular con EMG. Testados tanto al inicio (1ª semana), 4ª, 8ª y 12ª (última semana). Aumentó de forma significativa el 1 RM (30,5%) ($p < 0.001$), MVIC (13,3%), ACSA (11,4%) y EMG agonista (22,1%), sin diferencias entre grupos. La actividad EMG antagonista incrementó significativamente en el grupo SCC (40,5%) y C (23,3%), descendiendo en el grupo RS (13,5%). Un menor volumen de entrenamiento (sin llegar al fallo) produce las mismas ganancias de fuerza, activación muscular y ACSA, que un volumen superior (llegando al fallo). Una rápida activación muscular mediante las acciones concéntricas-excéntricas, es la responsable de igualar ambos tipos de

entrenamiento: alcanzar el fallo no es la única alternativa si lo que se pretende mejorar, es la fuerza e hipertrofia (Sampson y Groeller 2016).

El reciente estudio de Santanielo et al. (2020) observó que efectos tenía sobre la activación muscular, masa magra y fuerza, 2 tipos de entrenamiento de resistencia en población entrenada: 1) Alcanzando la última repetición posible en cada serie o “Muscle Failure” (RT-F) y 2) evitando llegar hasta la fatiga muscular máxima o “non-failure” (RT-NF) (intensidad submáxima). Un diseño intra-sujeto con 14 varones jóvenes ($23 \pm 2,2$ años) con experiencia en entrenamiento de fuerza de miembros inferiores (realizando ejercicios de extensión y prensa de piernas 45° en sus rutinas, con frecuencia 2, desde hace 2 años) y sin tomar esteroides anabólicos en el último año; fueron asignados al azar a RT-F o a RT-NF. El protocolo de entreno fue llevado a cabo durante 10 semanas, con frecuencia 2. Se evaluaron el ACSA, PA, FL (con US) y 1 RM, al inicio y después de las 20 sesiones. La activación muscular con EMG, únicamente se testó al final del estudio. Ambos protocolos resultaron en incrementos significativos similares en el ACSA (RT-F: 13,5% y RT-NF: 18,1%; $p < 0.0001$), PA (RT-F: 13,7% y RT-NF: 14,4%; $p < 0.001$) y FL (RT-F: 11,8% y RT-NF: 8,6%; $p < 0.0001$). También, el 1 RM aumentó en la prensa de piernas (RT-F: 22,3% y RT-NF: 26,7%; $p < 0.0001$) y en la extensión de piernas (RT-F: 33,3%, $p < 0.0001$ y RT-NF: 33,7%; $p < 0.0001$), de forma similar. No se han observado diferencias significativas en la amplitud de EMG ($p > 0.05$) entre ambos grupos. Programar un entrenamiento a RT-F o a RT-NF, es igual de eficaz de cara a ganar hipertrofia ME, fuerza y activación fibrilar (T.I y II), en individuos entrenados (Santanielo et al., 2020).

Stefanaki et al. (2019) compararon la efectividad que presentaba el fallo muscular sobre las ganancias de masa muscular y fuerza, en mujeres jóvenes no entrenadas (a lo largo de 6 semanas), mediante dos protocolos de entrenamiento de resistencia: 1) cargas bajas (30% RM) y 2) cargas altas (80% RM). 13 mujeres ($29 \pm 4,7$ años) con asignación al azar (al 30 o 80% RM), realizaron un entrenamiento de 1 serie al fallo de extensiones de pierna unilaterales + 1 serie de flexiones de bíceps en cada extremidad, 2 veces por semana. Se testó el 1 RM en ambos ejercicios. El MT del VL y bíceps braquial (BB) con US y la composición corporal con pletismografía de desplazamiento de aire (BodPod). Recabando estas

mediciones 3-4 días previo al inicio, y al final del estudio. La fuerza 1 RM aumentó en brazos ($15,4 \pm 12,2\%$ al 30% RM, $18,26 \pm 12,2\%$ al 80% RM) y piernas ($25,30 \pm 18,4$ al 30% RM, $27,20 \pm 14,5$ al 80% RM), al igual que el MT en brazos ($6,81 \pm 3,15\%$ al 30 %RM, $5,90 \pm 3,13\%$ al 80% RM) y piernas ($9,37 \pm 5,61\%$ al 30% RM, $9,13 \pm 7,9\%$ al 80% RM); sin diferencias significativas entre las cargas. La magnitud de la carga no determina una mayor respuesta hipertrófica o de fuerza, cuando los ejercicios son llevados hasta el fallo muscular, en mujeres sin experiencia en entrenamiento de fuerza. Siendo la fatiga muscular clave, en el desarrollo de las adaptaciones neurales y ME (Stefanaki et al., 2019).

Hace unos años Stock et al. (2017) examinaron con un estudio intra-sujeto, como evolucionaba a corto plazo la hipertrofia, estimulando el músculo mediante acciones concéntricas; evitando el estrés metabólico que implican las acciones excéntricas. Durante 4 semanas, 13 varones jóvenes (23 ± 4 años) sin experiencia en entrenamiento de fuerza, realizaron “Curl de bíceps unilateral” y “press de hombro” de manera concéntrica, hasta alcanzar el fallo muscular. Se utilizó la asignación aleatoria para establecer, si realizaban el entrenamiento con su brazo dominante ($n = 6$) o no dominante ($n = 7$). El protocolo constaba de 5 series de 8-12 repeticiones durante las 2 primeras semanas, incrementando a 6 series las 2 últimas. La carga intra-sesión se estableció en un 70% RM (pudiendo oscilar a lo largo del entreno, teniendo en cuenta que el fallo tenía que aparecer entre las repeticiones establecidas). Se evaluaron el dolor (escala Likert), la masa libre de grasa, el MT (DEXA), la intensidad del eco (ecografía - refleja la calidad muscular), la circunferencia de brazo relajado-flexionado (cinta métrica) y la fuerza isocinética (dinamómetro isocinético); cada 24-48 h. post. sesión de entreno. Las variables dolor, intensidad de eco, circunferencia relajada y la fuerza, no obtuvieron significación estadística. Si hubo un incremento significativo en la masa libre de grasa, MT y circunferencia flexionada, después de las 7 sesiones de entrenamiento. Este estudio contrasta con evidencia previa: las personas que inician un programa de fuerza concéntrico con objetivos hipertróficos (llevado hasta la máxima fatiga muscular), obtienen ganancias leves a las 4 semanas. Siendo poco tiempo de entrenamiento, para modificar la arquitectura muscular y mejorar las conexiones neuronales (Stock et al., 2017).

En este último ECA, Teodoro et al. (2019) compararon las adaptaciones neurales y musculares, después de un entrenamiento concurrente (fuerza y cardio) de 20 semanas (largo plazo). Un grupo realizó el protocolo de repeticiones hasta el fallo y los otros 2, se quedaron cerca del mismo. 36 varones mayores ($67 \pm 5,1$ años) se sometieron a aleatorización, resultando en 3 grupos: 1) "Repetitions to Failure" (RFG, $n = 13$), 2) "Repetitions Not to Failure" (50% de las repeticiones del RFG) (NFG, $n = 12$) y 3) "Repetitions Not to Failure" (mismo volumen de entreno que RFG) (ENFG, $n = 11$). Las sesiones comenzaron con los ejercicios de fuerza (LP y KE), dejando para el final el trabajo aeróbico en cinta de correr. La carga partió desde el 65% RM (semana 1 a 4), incrementándose progresivamente en un 5% cada 4 semanas, hasta alcanzar el 75% RM, en la semana 9-11. En la semana 12 se aplicó una descarga, reduciendo el volumen en un 80%. Posteriormente, desde la semana 13 a la 20, se entrenó al 80% RM. La recuperación entre series fue siempre de 2 minutos. Se testaron, el 1 RM de prensa de piernas (LP) y de extensiones de rodilla (KE) pre-post. programa de entreno. También, el torque pico isométrico o máxima fuerza isométrica de los extensores de rodilla (PTiso) y la tasa de desarrollo de torque o capacidad para generar fuerza explosiva (RTD): a 50 ms., 10 ms. y 250 ms. (con dinamómetro isocinético). El MT del cuádriceps con ecografía y el rendimiento funcional (capacidad aeróbica) con el "Sit-To-Stand" (STS) y el "Timed Up and Go" (TUG). Se vieron aumentos significativos ($p < 0.001$) en el 1 RM, PTiso y RTD en todos los grupos. De igual manera, en el MT del cuádriceps y en el STS ($p < 0.05$). No existieron diferencias significativas entre los grupos. Un entrenamiento concurrente que implique fallo muscular concéntrico no repercutió en beneficios adicionales: siendo igual de efectivo, quedarse cerca del fallo muscular, evitando un mayor estrés y fatiga. Realizar un 50% de las repeticiones posibles (grupo NFG), optimizó el rendimiento funcional e hipertrófico en el largo plazo (Teodoro et al., 2019).

5. Discusión

En esta discusión se van a desarrollar los diferentes objetivos planteados en la revisión bibliográfica, teniendo en cuenta los resultados planteados. Se sacarán conclusiones certeras, acerca de si el fallo muscular es una buena estrategia de entrenamiento orientado a la hipertrofia, fuerza y salud muscular (pudiendo hacer recomendaciones a nivel poblacional). Por otra parte, se planteará si la carga de entrenamiento es otro factor interesante, de cara a maximizar las ganancias de fuerza y masa muscular. Por último, la duración de la repetición (el estrés que esto conlleva a nivel fisiológico y muscular), previo a la consecución del fallo muscular.

5.1. *El fallo muscular mejora las ganancias de fuerza e hipertrofia*

Hace una década, Mitchell et al. (2012) examinaron con un ECA, si el fallo muscular resultaba efectivo con diferentes cargas de entrenamiento (% RM), en población sin experiencia en musculación. 18 varones jóvenes realizaron extensiones de rodilla unilaterales hasta el fallo muscular, al 30% o 80% RM. El ACSA, las fibras T.I-II, MVIC, RFD y potencia máx. (del cuádriceps) aumentaron en todos los grupos, sin significación entre ellos. En cambio, el 1 RM solo aumentó en los grupos al 80% RM. 3 años más tarde, Jenkins et al. (2015) realizaron otro ECA con intervención en el cuádriceps (llevada hasta el fallo muscular), tanto en hombres (n = 9) y mujeres (n = 9) jóvenes. El ACSA incrementó en ambos grupos (80% y 30% RM), siendo superior en el del 30%; al igual que el volumen total, iEMG y TUCL. Resultando en mejores adaptaciones hipertróficas en la propuesta al 30% RM (> fatiga) y en un incremento de la fuerza 1 RM para las cargas al 80% RM; contrastando con el trabajo de Mitchell et al. (2012). Sin embargo, Sampson y Groeller (2016) continuaron investigando sobre el fallo muscular, en población desentrenada. 28 varones fueron sometidos a un ECA: un grupo sometido a diferentes velocidades de repetición evitando el fallo y el otro, alcanzando el fallo muscular. Con una carga al 85% RM, realizaron flexiones de codo. El 1 RM, MVIC, ACSA y EMG aumentaron, sin diferencias entre grupos. Proponen que el fallo muscular resulta en similares ganancias de fuerza e hipertrofia, qué no llevando el

músculo hasta ese estrés metabólico final; contradiciendo tanto a Mitchell et al. (2012) y Jenkins et al. (2015).

En el mismo año, Fink et al. (2016) realizaron un ECA en el que incluyeron un protocolo mixto de cargas, para demostrar si el fallo muscular con variación de la carga resultaba en mejores adaptaciones hipertróficas y neurales que los protocolos tradicionales continuos. 21 varones jóvenes sin experiencia se dividieron: en grupos al 80% RM, 30% RM y mixto (cambio cada 2 semanas), para ejecutar flexiones de codo. El ACSA no presentó diferencias entre grupos: la MVC isométrica y la RFD aumentaron en el grupo del 80% RM. No existieron diferencias significativas para las ganancias hipertróficas, en un período de 8 semanas, por lo que el fallo muscular resulta óptimo con cualquier carga; respaldando las conclusiones previas de Sampson Groeller (2016). La fuerza 1 RM sí que mejora en protocolos con mayor carga siendo llevada hasta el fallo, generando nueva evidencia; poco concisa en estudios previos (Mitchell et al., 2012; Jenkins et al., 2015; Sampson y Groeller 2016). En el mismo año, Morton et al. (2016) también investigaron si una "Full Body" con diferentes cargas hasta el fallo muscular, mejoraba la hipertrofia y fuerza en varones no entrenados. 49 varones fueron aleatorizados al azar en un grupo al 30-50% RM o al 75-90% RM. La 1 RM incrementó en todos los ejercicios de los 2 grupos, como la masa libre de grasa y el ACSA, sin diferencias entre ambos. De acuerdo con Fink et al. (2016) y Sampson y Groeller (2016), aplicar un programa de entrenamiento al fallo induce unas respuestas anabólicas similares entre diferentes cargas (30-90% RM), en un amplio rango de repeticiones (8-25).

Más adelante, Martorelli et al. (2017) examinaron si resultaba en un mayor beneficio / perjuicio (de cara a maximizar las adaptaciones musculares), aplicar o no el fallo muscular, en mujeres jóvenes sin experiencia. En este ECA se aleatorizó en 3 grupos a las participantes, haciendo flexiones de codo bilateral 2 días a la semana, al 70% RM (durante 10 semanas). La 1 RM, PT, MT mejoraron en todos los grupos, siendo más significativas, en los grupos con mayor volumen de entrenamiento. Esto respalda que un mayor volumen de trabajo induce a ganancias hipertróficas superiores, sin tener que llegar a la fatiga muscular máxima (o fallo en la repetición). El fallo muscular no aporta beneficios extras en el corto plazo, abriendo de nuevo

un abanico de evidencia; respecto a estudios previos (Fink et al., 2016; Mitchell et al., 2012; Morton et al., 2016; Jenkins et al., 2015; Sampson y Groeller 2016).

El mismo año Haun et al. (2017), Jenkins et al. (2017) y Stock et al. (2017) realizaron 2 ECA y un estudio intra-sujeto, respectivamente. Estos analizaron las mejoras hipertróficas y de fuerza, que suponía practicar el fallo muscular en la repetición (dentro de un programa de ejercicio con varones jóvenes, sin experiencia). En el ECA de Haun et al. (2017) y Jenkins et al. (2017) aleatorizaron la muestra en 2 grupos: cargas al 80% RM o 30% RM. En ambos estudios realizaron extensiones de pierna hasta el fallo muscular (4 series), varias veces a la semana (3 y 2). Los resultados fueron similares: existiendo un incremento del 1 RM en los grupos al 80% RM. Se obtuvo mayor número de repeticiones en los grupos al 30% RM, alcanzando buena respuesta EMG. También, incrementó la masa muscular en ambos grupos, sin diferencias significativas. La carga pesada (80% RM), fue más eficiente en ganancias de fuerza e hipertrofia: el realizar un menor número de repeticiones hasta el fallo muscular, permitió una mejor recuperación en el tiempo. Ambos estudios confirmaron una mayor eficacia al 80% RM, para las ganancias de 1 RM, por una mejor adaptación neuronal intra y post-entreno. Además, complementaron la información otorgada por Fink et al. (2016), Sampson y Groeller (2016) y Morton et al. (2016): la hipertrofia miofibrilar incrementa en función de la intensidad de las cargas, por encima del 40% RM (produciéndose mejores respuestas anabólicas). Stock et al. (2017) examinaron que ocurría a nivel hipertrófico durante 4 semanas de entrenamiento de Curl de bíceps unilateral y Press de hombro (5 series de 8-12 repeticiones). Con cargas al 70% RM, incrementaron la masa libre de grasa, MT y circunferencia de bíceps flexionado, después de 7 sesiones. Se ha establecido: un mínimo de 4 semanas para obtener ganancias leves a nivel hipertrófico, en personas sin experiencia en entrenamiento de fuerza. Estas ganancias se observaron de manera progresiva, en la intervención de Jenkins et al. (2017) de 6 semanas.

Un par de años después, las investigaciones de Lasevicius et al. (2018), Stefanaki et al. (2019), Morton et al. (2019) y Teodoro et al. (2019) continuaron investigando los efectos de fallo muscular, sobre las mejoras en la arquitectura muscular y neural. Tanto en varones y mujeres, con y sin experiencia en entrenamiento de

fuerza. Coincidiendo en lo postulado anteriormente: intensidades de carga ejecutadas hasta el fallo, en un rango del 20-80% RM (a mismo volumen de entrenamiento) produjeron mejoras hipertróficas y de fuerza. Lasevicius et al. (2018) confirman: las intensidades inferiores al 20% RM son subóptimas, apareciendo al 80% RM significación estadística para la fuerza y ACSA muscular. Realizaron un estudio intra-sujeto (30 varones jóvenes) programando flexiones de bíceps y extensiones de cuádriceps, a diferentes intensidades, durante 12 semanas: 20%, 40%, 60% y 80% RM. Stefanaki et al. (2019) plantearon en mujeres sin experiencia, un protocolo de cargas bajas (30% RM) y altas (80% RM) de extensiones de piernas y flexiones de bíceps unilaterales (2 veces por semana). La 1 RM y el MT aumentaron en todos los grupos, sin diferencias significativas. El fallo muscular mejora las adaptaciones musculares independientemente de la magnitud de la carga: siendo dicha fatiga clave en el desarrollo neuro-muscular humano (Fink et al., 2016; Lasevicius et al., 2018; Mitchell et al., 2012; Morton et al., 2016; Jenkins et al., 2015; Sampson y Groeller 2016).

Morton et al. (2019) examinaron en su ECA los efectos del fallo en la estructura muscular: 10 varones jóvenes con experiencia en entrenamiento de fuerza recreativo se sometieron a una aleatorización al azar. Se dividieron en 4 protocolos variando la carga (80% o 30% RM) y el "TUT" de la repetición, realizando extensiones de rodilla unilaterales. No existieron diferencias entre grupos, en las mejoras del ACSA, MVE EMG y tipo de fibras en el cuádriceps; siendo el fallo muscular efectivo en cualquier condición. Los hallazgos continúan la línea argumental de los descubrimientos paralelos de Stefanaki et al. (2019) y Lasevicius et al. (2018). El ECA de Teodoro et al. (2019) muestra similitudes con estos estudios, pero en población adulta mayor (>60 años). 36 varones se sometieron a aleatorización en 3 grupos: "Repetitions to Failure" (marca el volumen), "Repetitions Not to Failure" (1/2 del volumen inicial) y "Repetitions Not to Failure" (volumen inicial). Realizaron un entrenamiento concurrente de prensa y extensiones de pierna + cardio final. La intensidad de las cargas incrementó a lo largo de las 20 semanas (desde el 65% RM al 80% RM), con una descarga intermedia. Incrementaron en todos los grupos el 1 RM, PTiso, RTD, MT y STS sin diferencias entre ellos. Por lo que, el fallo muscular no resultó más efectivo de cara a ganancias

de fuerza, masa muscular y funcionalidad, en adultos mayores. Quedarse cerca del fallo muscular, es más efectivo debido a un menor estrés y fatiga en el largo plazo: mejorando el rendimiento funcional e hipertrófico (Martorelli et al., 2017; Sampson y Groeller 2016).

Las últimos estudios recogidos en esta revisión bibliográfica (Carroll et al., 2019; Santaniello et al., 2020; Lacerda et al., 2021) exponen que, un entrenamiento llevado hasta el fallo muscular (alta intensidad) mejora las ganancias hipertróficas y de fuerza (con cualquier carga). Sin embargo, Carroll et al. (2019) comentan: no resulta más efectivo que pausar voluntariamente la serie, previo llegar al éxtasis muscular (quedando una o varias repeticiones antes del fallo ME). En el ECA de Carroll et al. (2019) con población entrenada, observaron mejores respuestas anabólicas (ACSA, MT) después de un plan de entrenamiento ("Full Body" x 3 días semana / 10 semanas) sin buscar el fallo muscular, respecto al grupo que lo alcanzaba. Estos datos ponen en entredicho lo comentado en estudios previos (Fink et al., 2016; Mitchell et al., 2012; Sampson y Groeller 2016), teniendo en cuenta que previamente se había seleccionado población sin experiencia en entrenamiento de fuerza.

Santaniello et al. (2020) han examinado mediante un estudio intra-sujeto los beneficios del "Muscle Failure" en población entrenada, al igual que en el de Carroll et al. (2019). 14 varones jóvenes se dividieron en RT-F o RT-NF para realizar extensiones ($11 \pm 5,2$ series) y prensa 45° ($11,5 \pm 5,1$ series) de piernas, durante 10 semanas (frecuencia 2). Ambos protocolos resultaron en incrementos significativos similares del ACSA, PA, FL, amplitud EMG y 1 RM. A diferencia del de Carroll et al. (2019): no se observaron diferencias significativas a la hora de programar un entrenamiento a RT-F o a RT-NF, presentando eficacia similar para maximizar la hipertrofia, fuerza y activación fibrilar T.I-II. El estudio intra-sujeto de Lacerda et al. (2021) de 14 semanas, con 10 varones desentrenados pone de manifiesto, la importancia del fallo muscular independientemente del "TUT" de la repetición. La respuesta hipertrófica es similar en toda la muestra (3-4 series al 50-60% RM), coincidiendo con diversos estudios (Fink et al., 2016; Mitchell et al., 2012; Morton et al., 2019; Morton et al., 2016; Sampson y Groeller 2016; Stefanaki et al., 2019; Stock et al., 2017; Teodoro et al., 2019). En cambio, el fallo muscular

realizado con acciones más largas de repetición (6 s.), mejora la fuerza máxima isométrica (> MVIC) (Lacerda et al., 2021).

5.2. *¿Evitar el fallo muscular maximiza la fuerza y masa muscular?*

Tanto Martorelli et al. (2017) y Carroll et al. (2019) coinciden en que, un entrenamiento llevado hasta el fallo muscular no promueve mejores adaptaciones neurales ni hipertróficas, en hombres y mujeres. Ambos realizaron un ECA donde dividieron la muestra en un protocolo que incluía el fallo muscular, y otro donde se dejaban repeticiones en reserva. Después de analizar las respuestas fibrilares (T.I-II), fuerza 1 RM, ACSA, MT, PT y otras variables biológicas a lo largo de 10 semanas, concluyeron: un programa de entrenamiento sin buscar el fallo resulta más efectivo en términos hipertróficos (prevaleciendo intensidades submáximas) en población entrenada y desentrenada. Resaltaron que la fuerza mejoraba independientemente del fallo muscular, optimizándose con repeticiones cercanas al fallo. Por lo tanto, un mayor volumen de trabajo diario (series x repeticiones), evitando la fatiga muscular del fallo (< reps. x serie), maximiza las respuestas anabólicas; siendo la mejor opción para maximizar el desarrollo de fuerza y masa muscular.

Sin embargo, Sampson y Groeller (2016), Teodoro et al. (2019) y Santaniello et al. (2020) respaldan que llegar o no al fallo en un entrenamiento, produce las mismas ganancias de fuerza y masa muscular (si se utilizan cargas submáximas en torno al 80-85% RM). Mediante 2 ECA y un estudio intra-sujeto sometieron a la muestra a entrenar la musculatura de miembros superiores e inferiores (variando VOL, "TUT" y % RM). Analizaron el 1 RM, MVIC, ACSA, activación EMG, FL, MT y otras variables fisiológicas; sin observar diferencias significativas entre los grupos. Mejoraron todos su arquitectura neuro-muscular. El fallo muscular no reportó beneficios adicionales en el corto, ni medio plazo (4-12 semanas). Quedarse cerca del fallo evita un mayor estrés y fatiga. Optimizando el rendimiento hipertrófico en el largo plazo, en varones jóvenes (20-25 años) entrenados, desentrenados y adultos de mayor edad (60-70 años).

La evidencia científica recogida descarta que llevar el músculo hasta la extenuación muscular reporte en mayores beneficios, de cara a maximizar las ganancias de fuerza y masa muscular, en población adulta (joven o mayor, entrenada o no entrenada). De esta manera, es necesario que se siga investigando en futuras publicaciones: si el fallo muscular continúa siendo eficiente o en que contextos podría utilizarse a nivel estético y de salud. Todo ello, para obtener los mejores resultados neurales e hipertróficos en diferentes poblaciones y niveles de entrenamiento (Carroll et al., 2019; Martorelli et al., 2017; Sampson y Groeller 2016; Santaniello et al., 2020; Teodoro et al., 2019).

5.3. ***La carga y el fallo muscular en las adaptaciones neurales e hipertróficas***

Fink et al. (2016), Mitchell et al. (2012), Morton et al. (2019), Morton et al. (2016), Stefanaki et al. (2019) y Stock et al. (2017) determinaron que no existen diferencias significativas en las ganancias hipertróficas: si se realiza un protocolo de entrenamiento con diferentes intensidades de carga (% RM), llevado hasta el fallo muscular. Sin encontrar tampoco, hallazgos significativos en protocolos mixtos de cargas altas (>70% RM) y bajas (<50% RM). En el ECA de Fink et al. (2016) 21 varones jóvenes sin experiencia se aleatorizaron en un grupo con cargas altas (80% RM), bajas (30% RM) y mixto: resultando en mejoras hipertróficas y de fuerza en los brazos entrenados (flexiones de codo) en todos los grupos (ACSA, RFD, MVC). No existiendo diferencias entre ellos. De la misma manera Mitchell et al. (2012) seleccionaron a 18 varones jóvenes sin experiencia, para que realizaran extensiones de cuádriceps. Se aleatorizaron en un grupo al 30% RM, 80% RM (menor volumen) y 80% RM (mayor volumen): mejorando el ACSA, 1 RM, MVIC, RFD y potencia max., sin diferencias entre grupos. Recientemente Morton et al. (2019) estudiaron los mismos efectos en población entrenada en fuerza. En su ECA, seleccionaron a 10 varones jóvenes para que realizaran 4 protocolos de extensiones de rodilla (teniendo en cuenta el tiempo de la repetición): 80% RM (1:1:1), 80% RM (3:1:3), 30% RM (1:1:1) y 30% RM (3:1:3). Ningún grupo obtuvo significación estadística a nivel hipertrófico, demostrando que el fallo muscular es el factor clave (dejando en segundo lugar, la carga aplicada). En consonancia con los estudios analizados, Morton et al. (2016) especifica que un entrenamiento

llevado hasta el fallo muscular provoca respuestas anabólicas (masa libre de grasa y neurales) similares entre diferentes cargas (30-90% RM) y repeticiones (8-25) (en sujetos jóvenes entrenados). En años posteriores, Stefanaki et al. (2019) y Stock et al. (2017) realizaron un ECA y un estudio intra-sujeto (respectivamente), en población no entrenada. Dilucidaron que la magnitud de una carga no conlleva mejor desarrollo de masa muscular y fuerza, cuando los ejercicios son llevados hasta el fallo muscular, en mujeres / hombres jóvenes en un corto plazo (4-6 semanas). Observando a las 4 semanas (corto plazo), cambios hipertróficos leves cuando las cargas eran superiores al 70% RM.

Como en los estudios con población joven (Fink et al., 2016; Mitchell et al., 2012; Morton et al., 2019; Morton et al., 2016; Stefanaki et al., 2019; Stock et al., 2017), Teodoro et al. (2019) quisieron investigar en mayores (60-70 años) la variación de la carga, en un programa de 20 semanas (largo plazo). 36 varones partieron de una carga del 65% RM hasta el 80% RM (aumentando cada semana). Realizaron prensa y extensiones de piernas: mejorando su 1 RM, RTD y PTiso en todos los grupos ("Failure" o "Not to Failure" con diferentes volúmenes).

La bibliografía recogida establece: la aplicación del fallo muscular en un programa de entrenamiento (a corto, medio, largo plazo) consigue resultados similares de masa muscular, en un rango de 30-90% RM. La fuerza 1 RM mejora, utilizando protocolos ascendentes en la carga (% RM). Un mayor desarrollo de masa muscular promueve mayor fuerza (como consecuencia) (Fink et al., 2016; Mitchell et al., 2012; Morton et al., 2019; Morton et al., 2016; Stefanaki et al., 2019; Stock et al., 2017; Teodoro et al., 2019).

En contraposición a estas consideraciones, Haun et al. (2017), Jenkins et al. (2015), Jenkins et al. (2017), Lasevicius et al. (2018) y Martorelli et al. (2017) destacaron: realizar ejercicios con cargas pesadas (80% RM) resulta en una mejor eficiencia energética: implicando menor número de repeticiones, hasta llegar al fallo muscular (mayor capacidad de recuperación en el tiempo) y superior activación muscular. La hipertrofia miofibrilar incrementa en función (dosis-respuesta) de la intensidad (teniendo en cuenta el fallo muscular), por encima del 40% RM. Además, existe una mejor respuesta hipertrófica (señales anabólicas y MT), en propuestas de cargas

bajas (30% RM); demostrando el rol de la fatiga (muchas repeticiones hasta el fallo) muscular. Por el contrario, la fuerza 1 RM y ACSA se ven favorecidas por las cargas altas (significancia estadística con el 80% RM), si se consigue el fallo muscular voluntario. Siendo las adaptaciones neuronales y la propia activación de las fibras T.II claves para asumir tales demandas físicas. Se ha comprobado la existencia de un rango óptimo de intensidad (de la carga) entre el 20-80% RM, aplicando el fallo muscular. Favoreciendo la fuerza e hipertrofia en sujetos sin experiencia (mejoras subóptimas en cargas del 20% RM o inferiores).

Los estudios han propuesto la existencia de diferencias entre las cargas, a la hora de plantear objetivos hipertróficos o de fuerza (en población entrenada y desentrenada). Recomiendan incrementar la evidencia sobre este tema. Parece claro que la fuerza 1 RM es proporcional con intensidades y cargas más altas (80% RM). Aunque, se necesitan más estudios que aclaratorios (rangos de % RM óptimos para maximizar las ganancias hipertróficas). Los estudios asumen la existencia de ganancias físicas (desde un 30% RM), si la intensidad es llevada hasta el fallo muscular o cerca del mismo (en diferentes edades y poblaciones) (Carroll et al., 2019; Fink et al., 2016; Haun et al., 2017; Jenkins et al., 2015; Jenkins et al., 2017; Lasevicius et al., 2018; Martorelli et al., 2017; Mitchel et al., 2012; Morton et al., 2019; Morton et al., 2016; Sampson y Groeller 2016; Stefanaki et al., 2019; Stock et al., 2017; Teodoro et al., 2019).

5.4. *El tiempo de la repetición y el fallo muscular en la fuerza e hipertrofia*

Sampson y Groeller (2016) establecieron en su ECA de 4 semanas con varones desentrenados, que la “activación muscular” era un factor muy importante de cara a conseguir ganancias de fuerza e hipertrofia muscular. Observaron que realizar un “ciclo acortamiento-estiramiento” rápido, mejoraba las adaptaciones musculares tanto en los grupos que se quedaban lejos del fallo, como en los que llegaban hasta él. La duración de las fases concéntricas y excéntricas se estableció en 2 segundos, siendo las < 2 s. las que obtuvieron mejoras superiores (agonista-antagonista).

Más adelante Morton et al. (2019) y Lacerda et al. (2021) con diferentes protocolos de “TUT’s” en población entrenada: 1:1:1 / 3:1:3 y 2-6 s. respectivamente; estudiaron la efectividad anabólica, hipertrófica y de fuerza, de manera aguda (2 días) y en el medio plazo (14 semanas). Llegando a las siguientes conclusiones: “las repeticiones llevadas hasta el fallo muscular producen una activación anabólica y fibrilar independiente de la “TUT” (pasando a un segundo plano)”. Siendo las repeticiones clásicas de duración “regular” (1:1:1) igual de efectivas, que las más largas “slow” (3:1:3). Un mayor volumen de acciones rápidas (2 s.), produce la misma hipertrofia que “TUT’s” más elevadas (6 s.), involucrando movimientos más lentos. Por último, se demostró que, para maximizar las ganancias de fuerza máxima isométrica, un protocolo de “TUTs” prolongados (6 o más segundos) es lo más conveniente en el medio plazo (por su > MVIC).

La evidencia científica contrastada contempla el tiempo en la repetición, como un factor para tener en cuenta, de cara a estimular la activación muscular. Realizar repeticiones más rápidas, con una menor carga (30-50% RM) o más lentas con una mayor carga (80% RM), permiten mejoras hipertróficas y del 1 RM. Se debe seguir investigando en futuros estudios, el rol de los diferentes “TUTs” en las mejoras de masa y fuerza muscular (con diferentes cargas, poblaciones y tamaños muestrales más amplios) (Lacerda et al., 2021; Morton et al., 2016; Sampson y Groeller 2016).

Dando respuesta al objetivo general de esta revisión: el entrenamiento de resistencia llevado hasta el fallo muscular incrementa el desarrollo muscular y la fuerza, en líneas generales. Aplicar altas intensidades, generando mayor fatiga a nivel fibrilar, reta al músculo a modificar su arquitectura, mejorando su composición, grosor y área transversal. De esta manera, se encuentra preparado para asumir diferentes intensidades de carga, volumen y duración en las repeticiones. Sin embargo, en los estudios más recientes no se han reportado mayores ganancias, respecto a los sujetos que se quedaron cerca del mismo. Se necesitan nuevos estudios para aclarar, en que contextos el fallo muscular puede ser la mejor estrategia, para las diversas poblaciones.

6. Futuras líneas de investigación

En esta revisión bibliográfica se han examinado un total de 16 publicaciones académicas arbitradas, en las que el fallo muscular en la repetición fue el protagonista. Quedando claras las mejoras en el desarrollo hipertrófico y fuerza muscular, con la implementación de esta técnica de entrenamiento.

En todos los estudios experimentales se ha planteado el fallo muscular en diferentes condiciones de entrenamiento, incluso comparándolo con repeticiones que no tenían como objetivo, llegar hasta el éxtasis muscular final. Se han recogido el doble de intervenciones en población sin experiencia en entrenamiento de fuerza (o que estuvieron sin realizar fuerza 6 meses o >): un total de 11, por los 5 en población entrenada. Estos datos, afloran la necesidad actual de recolectar sujetos con experiencia en musculación o culturismo, para establecer con mejor precisión los resultados obtenidos (en este tipo de población). Se ha consensuado en sujetos noveles, predisposición para mejorar su composición corporal y valores de fuerza, independientemente de si aplican o no el fallo muscular. Pero, se ha visto en sujetos entrenados (dominan más variables de intensidad: carga, volumen, duración de la repetición), que el volumen total diario (sin llegar al fallo) es más efectivo para maximizar sus ganancias musculares. Se necesitan más estudios para ampliar, estas nuevas consideraciones.

La gran mayoría de los estudios, recogen a varones jóvenes. Tanto las mujeres, como los adultos de mediana y mayor edad, representan un menor % de análisis. Puede ser debido a que conforman un grupo poblacional, con menor representación en el sector fitness. Futuros investigadores deben reflexionar sobre incluir en sus intervenciones a mujeres y población envejecida: desde los últimos años están empezando desarrollarse en este ámbito de la salud y estética. Resultaría interesante poder extrapolar los hallazgos encontrados (en mayor medida) en estos sectores.

Los estudios han mostrado una buena calidad metodológica, siendo necesario ampliar las muestras y el tiempo de intervención. Así se conseguirá afinar en las recomendaciones en el largo plazo. La mayoría de las intervenciones duran en

torno a 4-16 semanas (1-4 meses). Es cierto, que a partir de las 4 semanas ya comienzan a existir adaptaciones crónicas ME. Sin embargo, mayores tiempos de entrenamiento analizando el fallo muscular, dejan un mar de luz por navegar.

En futuras líneas de investigación (con mayor tamaño muestral, mayor tiempo de entrenamiento) con diferentes sectores poblacionales (entrenados o no entrenados), se afirmará con mayor peso científico; recomendaciones para quienes quieran maximizar su masa muscular, fuerza y estado de salud. Hasta el momento, el fallo muscular prevalece, con sus pros y su contras, como una técnica efectiva, para quien la quiera utilizar.

7. Conclusiones

En base a la formulación de los objetivos principal y secundarios de esta revisión bibliográfica, los estudios concluyen: Los programas de entrenamiento de resistencia llevados hasta el “Muscle Failure” mejoran la arquitectura neuro-muscular del cuerpo, en cualquier condición de entrenamiento y población. Por ello, entrenar a una alta intensidad (estimulando todo el rango fibrilar) incrementa las adaptaciones agudas y crónicas: a nivel hipertrófico (MT, ACSA) y en la fuerza (1 RM, RFD, MVIC). Algunos estudios demostraron que el fallo muscular no implicaba un mayor beneficio, respecto a quedarse cerca del mismo (incluso presentando peores resultados) en el medio plazo. El fallo muscular se ve potenciado con el levantamiento de cargas más altas (80% RM), para incrementar la fuerza 1 RM. Sin embargo, existe consenso en afirmar que la hipertrofia muscular se consigue en un rango de 30-90% RM, siempre y cuando prevalezca la alta intensidad en la repetición (quedarse cerca o fallar voluntariamente). Los diversos autores no encontraron diferencias significativas a la hora de establecer diferentes “TUTs” en las repeticiones: tiempos bajos (2 s.) o altos (6 s.) con diferentes cargas (% RM), permiten mejorar la masa muscular y el 1 RM, si se alcanza el fallo muscular en la última repetición. Positivamente, se ha demostrado que el fallo muscular resulta efectivo. Aunque los autores no han podido establecer significancia estadística respecto a no realizarlo (si se finaliza la serie cerca del mismo o manteniendo una alta intensidad estímulo-fatiga). Se debe considerar realizar más estudios, para establecer en que contextos el fallo muscular puntual, es la mejor estrategia de cara a maximizar las ganancias de fuerza e hipertrofia muscular.

8. Referencias bibliográficas

- Carroll, K. M., Bazylar, C. D., Bernards, J. R., Taber, C. B., Stuart, C. A., DeWeese, B. H., Sato, K. y Stone, M. H. (2019). Skeletal Muscle Fiber Adaptations Following Resistance Training Using Repetition Maximums or Relative Intensity. *Sports (Basel, Switzerland)*, 7(7). doi: 10.3390/sports7070169
- Fink, J., Kikuchi, N., Yoshida, S., Terada, K. y Nakazato, K. (2016). Impact of high versus low fixed loads and non-linear training loads on muscle hypertrophy, strength and force development. *SpringerPlus*, 5(1), 698. doi: 10.1186/s40064-016-2333-z
- Gonzalez, A. M., Ghigiarelli, J. J., Sell, K. M., Shone, E. W., Kelly, C. F. y Mangine, G. T. (2017). Muscle activation during resistance exercise at 70% and 90% 1-repetition maximum in resistance-trained men. *Muscle & Nerve*, 56(3), 505–509. doi: 10.1002/mus.25509
- Grgic, J. y Schoenfeld, B. J. (2018). Are the Hypertrophic Adaptations to High and Low-Load Resistance Training Muscle Fiber Type Specific? *Frontiers in physiology*, 9, 402. doi: 10.3389/fphys.2018.00402
- Grgic, J., Schoenfeld, B. J., Orazem, J. y Sabol, F. (2021). 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*, 1-10. doi: 10.1016/j.jshs.2021.01.007
- Haun, C. T., Mumford, P. W., Roberson, P. A., Romero, M. A., Mobley, C. B., Kephart, W. C., Anderson, R. G., Colquhoun, R. J., Muddle, T. W. D., Luera, M. J., Mackey, C. S., Pascoe, D. D., Young, K. C., Martin, J. S., DeFreitas, J. M., Jenkins, N. D. M. y Roberts, M. D. (2017). Molecular, neuromuscular, and recovery responses to light versus heavy resistance exercise in young men. *Physiological Reports*, 5(18). doi: 10.14814/phy2.13457
- Izquierdo, M., Ibañez, J., González-Badillo, J. J., Häkkinen, K., Ratamess, N. A., Kraemer, W. J., French, D. N., Eslava, J., Altadill, A., Asiain, X. y Gorostiaga,

- E. M. (2006). Differential effects of strength training leading to failure versus not to failure on hormonal responses, strength, and muscle power gains. *Journal of Applied Physiology*, 100(5), 1647–1656. doi: 10.1152/jappphysiol.01400.2005
- Jenkins, N., Housh, T., Bergstrom, H., Cochrane, K., Hill, E., Smith, C., Johnson, G., Schmidt, R., Cramer, J., Jenkins, N. D. M., Housh, T. J., Bergstrom, H. C., Cochrane, K. C., Hill, E. C., Smith, C. M., Johnson, G. O., Schmidt, R. J. y Cramer, J. T. (2015). Muscle activation during three sets to failure at 80 vs. 30% 1RM resistance exercise. *European Journal of Applied Physiology*, 115(11), 2335–2347. doi: 10.1007/s00421-015-3214-9
- Jenkins, N. D. M., Miramonti, A. A., Hill, E. C., Smith, C. M., Cochrane-Snyman, K. C., Housh, T. J. y Cramer, J. T. (2017). Greater Neural Adaptations following High- vs. Low-Load Resistance Training. *Frontiers in Physiology*, 8, 331. doi: 10.3389/fphys.2017.00331
- Lacerda, L. T., Marra-Lopes, R. O., Lanza, M. B., Diniz, R. C. R., Lima, F. V., Martins-Costa, H. C., Pedrosa, G. F., Gustavo Pereira Andrade, A., Kibele, A. y Chagas, M. H. (2021). Resistance training with different repetition duration to failure: effect on hypertrophy, strength and muscle activation. *PeerJ*, 9, e10909. doi: 10.7717/peerj.10909
- Lasevicius, T., Ugrinowitsch, C., Schoenfeld, B. J., Roschel, H., Duarte Tavares, L., Oliveira De Souza, E., Laurentino, G. y Tricoli, V. (2018). Effects of different intensities of resistance training with equated volume load on muscle strength and hypertrophy. *European Journal of Sport Science*, 18(6), 772–780. doi: 10.1080/17461391.2018.1450898
- Martorelli, S., Cadore, E. L., Izquierdo, M., Celes, R., Martorelli, A., Cleto, V. A., Alvarenga, J. G. y Bottaro, M. (2017). Strength Training with Repetitions to Failure does not Provide Additional Strength and Muscle Hypertrophy Gains in Young Women. *European Journal of Translational Myology*, 27(2), 6339. doi: 10.4081/ejtm.2017.6339

- Mitchell, C. J., Churchward-Venne, T. A., West, D. W. D., Burd, N. A., Breen, L., Baker, S. K. y Phillips, S. M. (2012). Resistance exercise load does not determine training-mediated hypertrophic gains in young men. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 113(1), 71–77. doi: 10.1152/jappphysiol.00307.2012
- Morton, R. W., Sonne, M. W., Farias Zuniga, A., Mohammad, I. Y. Z., Jones, A., McGlory, C., Keir, P. J., Potvin, J. R. y Phillips, S. M. (2019). Muscle fibre activation is unaffected by load and repetition duration when resistance exercise is performed to task failure. *The Journal of Physiology*, 597(17), 4601–4613. doi: .1113/JP278056
- Morton, R. W., Oikawa, S. Y., Wavell, C. G., Mazara, N., McGlory, C., Quadriatero, J., Baechler, B. L., Baker, S. K. y Phillips, S. M. (2016). Neither load nor systemic hormones determine resistance training-mediated hypertrophy or strength gains in resistance-trained young men. *Journal of Applied Physiology (Bethesda, Md. : 1985)*, 121(1), 129–138. doi: 10.1152/jappphysiol.00154.2016
- Nóbrega, S. R. y Libardi, C. A. (2016). Is Resistance Training to Muscular Failure Necessary? *Frontiers in Physiology*, 7, 10. doi: 10.3389/fphys.2016.00010
- Ogborn, D. y Schoenfeld, B. J. (2014) The Role of Fiber Types in Muscle Hypertrophy. *Strength and Conditioning Journal*, 36(2), 20-25. doi: 10.1519/SSC.0000000000000030
- Santaniello, N., Nóbrega, S. R., Scarpelli, M. C., Alvarez, I. F., Otoboni, G. B., Pintanel, L. y Libardi, C. A. (2020). Effect of resistance training to muscle failure vs non-failure on strength, hypertrophy and muscle architecture in trained individuals. *Biology of Sport*, 37(4), 333–341. doi: 10.5114/biol sport.2020.96317
- Sampson, J. A. y Groeller, H. (2016). Is repetition failure critical for the development of muscle hypertrophy and strength? *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 26(4), 375–383. doi: 10.1111/sms.12445

- Schoenfeld, B. J., Contreras, B., Krieger, J., Grgic, J., Delcastillo, K., Belliard, R. y Alto, A. (2019). Resistance Training Volume Enhances Muscle Hypertrophy but Not Strength in Trained Men. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 51(1), 94–103. doi: 10.1249/MSS.0000000000001764
- Schoenfeld, B. J., Ogborn, D. I. y Krieger, J. W. (2015). Effect of repetition duration during resistance training on muscle hypertrophy: a systematic review and meta-analysis. *Sports Medicine (Auckland, N.Z.)*, 45(4), 577–585. doi:10.1007/s40279-015-0304-0
- Stefanaki, D. G. A., Dzulkarnain, A. y Gray, S. R. (2019). Comparing the effects of low and high load resistance exercise to failure on adaptive responses to resistance exercise in young women. *Journal of Sports Sciences*, 37(12), 1375–1380. doi: 10.1080/02640414.2018.1559536
- Stock, M. S., Mota, J. A., DeFranco, R. N., Grue, K. A., Jacobo, A. U., Chung, E., Moon, J. R., DeFreitas, J. M. y Beck, T. W. (2017). The time course of short-term hypertrophy in the absence of eccentric muscle damage. *European Journal of Applied Physiology*, 117(5), 989–1004. doi: 10.1007/s00421-017-3587-z
- Teodoro, J. L., da Silva, L. X. N., Fritsch, C. G., Baroni, B. M., Grazioli, R., Boeno, F. P., Lopez, P., Gentil, P., Bottaro, M., Pinto, R. S., Izquierdo, M. y Cadore, E. L. (2019). Concurrent training performed with and without repetitions to failure in older men: A randomized clinical trial. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 29(8), 1141–1152. doi: 10.1111/sms.13451