



REVISIÓN

¿Desempeña un papel decisivo la excitabilidad corticoespinal ipsilateral en el efecto cruzado provocado por el entrenamiento de fuerza unilateral? Una revisión sistemática

D. Colomer-Poveda^a, S. Romero-Arenas^a, T. Hortobagyi^b y G. Márquez^{a,*}

^a Departamento de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte, Facultad de Deporte-UCAM, Universidad Católica de Murcia, Murcia, España

^b Center for Human Movement Sciences, University of Groningen, University Medical Center Groningen, Groningen, Países Bajos

Recibido el 8 de mayo de 2017; aceptado el 22 de septiembre de 2017

PALABRAS CLAVE

Entrenamiento unilateral;
Excitabilidad corticoespinal;
Estimulación magnética transcraneal;
Médula espinal;
Potencial motor evocado

Resumen

Introducción: El entrenamiento de fuerza unilateral ha demostrado provocar aumentos de fuerza tanto en la extremidad entrenada como en la no entrenada. Una de las teorías actuales más aceptadas defiende que el origen de dicho aumento de rendimiento se encuentra en adaptaciones en el sistema nervioso, concretamente en la corteza motora primaria, siendo los aumentos en la excitabilidad corticoespinal (EC) medida con estimulación magnética transcraneal una de las principales adaptaciones observadas tras periodos crónicos de entrenamiento. Por ello, el principal objetivo es hacer un análisis de la literatura actual para determinar el grado de adaptación que se da en la EC y su posible relación funcional con el aumento de fuerza de la extremidad no entrenada.

Desarrollo: Se llevó a cabo una búsqueda sistemática en la literatura existente entre enero de 1970 hasta diciembre de 2016 en las bases de datos online Medline (vía PubMed), Ovid, Web of Science y Science Direct con la siguiente estrategia de búsqueda: (*Transcranial magnetic stimulation OR excitability*) Y (*strength training OR resistance training or force*) Y (*cross transfer OR contralateral limb OR cross education*). Finalmente se incluyeron un total de 10 artículos.

Conclusiones: Existe cierta inconsistencia en los resultados referentes al aumento de la EC. Aunque no se puede descartar que dicha inconsistencia se deba a aspectos metodológicos, los resultados parecen indicar que el aumento de fuerza y el incremento en la EC podrían no estar funcionalmente relacionados.

© 2017 Sociedad Española de Neurología. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: gmarquez@ucam.edu (G. Márquez).

KEYWORDS

Unilateral training;
Corticospinal
excitability;
Transcranial magnetic
stimulation;
Spinal cord;
Motor evoked
potential

Does ipsilateral corticospinal excitability play a decisive role in the cross-education effect caused by unilateral resistance training? A systematic review

Abstract

Introduction: Unilateral resistance training has been shown to improve muscle strength in both the trained and the untrained limb. One of the most widely accepted theories is that this improved performance is due to nervous system adaptations, specifically in the primary motor cortex. According to this hypothesis, increased corticospinal excitability (CSE), measured with transcranial magnetic stimulation, is one of the main adaptations observed following prolonged periods of training. The principal aim of this review is to determine the degree of adaptation of CSE and its possible functional association with increased strength in the untrained limb.

Development: We performed a systematic literature review of studies published between January 1970 and December 2016, extracted from Medline (via PubMed), Ovid, Web of Science, and Science Direct online databases. The search terms were as follows: (transcranial magnetic stimulation OR excitability) AND (strength training OR resistance training OR force) AND (cross transfer OR contralateral limb OR cross education). A total of 10 articles were found.

Conclusion: Results regarding increased CSE were inconsistent. Although the possibility that the methodology had a role in this inconsistency cannot be ruled out, the results appear to suggest that there may not be a functional association between increases in muscle strength and in CSE.

© 2017 Sociedad Española de Neurología. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

El entrenamiento de fuerza unilateral, es decir, aquel que se ejecuta con una sola extremidad mientras la contralateral permanece en reposo, ha demostrado provocar un aumento de fuerza no solo en el miembro que entrena, sino también en el músculo homólogo contralateral^{1,2}. Este aumento de fuerza en el músculo no entrenado se conoce como efecto cruzado del entrenamiento de fuerza unilateral³. Dichos cambios en el rendimiento en ausencia de entrenamiento son una de las evidencias más claras que demuestran la gran plasticidad que posee el sistema nervioso. Además, debido a su singularidad, este efecto ha atraído la atención de científicos procedentes del área de la rehabilitación, debido a la posibilidad de utilizarlo como contramedida en ciertas lesiones unilaterales (hemiparesia provocada por accidente cerebrovascular, lesiones osteoarticulares unilaterales, etc.).

Con respecto a los mecanismos que explican este efecto cruzado existe cierto consenso en atribuir parte, si no toda la responsabilidad, a adaptaciones de tipo neural³⁻⁶. Esto es debido principalmente a la aparente ausencia de adaptaciones periféricas en el músculo esquelético de la extremidad no entrenada⁷⁻¹⁰. Además de dicha ausencia de adaptaciones periféricas, estudios con resonancia magnética funcional o estimulación magnética transcraneal (EMT) han demostrado cierta activación bilateral del tracto corticoespinal durante contracciones de carácter unilateral¹¹⁻¹⁴. Por tanto, se piensa que esta activación ipsilateral repetida en el tiempo, durante un periodo crónico de entrenamiento de fuerza, podría dar lugar a adaptaciones en dichas estructuras. Sin embargo, existe cierta controversia a la hora de determinar qué estructuras del sistema nervioso central son responsables de las adaptaciones que conllevan un aumento

de rendimiento en la extremidad que no entrena. Es por ello que el foco de estudio se ha centrado, principalmente, en determinar qué estructuras corticales, subcorticales y espinales cambian cuando se realiza entrenamiento de forma unilateral.

En este sentido, los estudios realizados hasta la fecha descartan adaptaciones a nivel espinal en la extremidad no entrenada, ya que tras periodos crónicos de entrenamiento no se han encontrado cambios en parámetros como el reflejo de Hoffman, técnica ampliamente utilizada para medir posibles cambios en la excitabilidad de las motoneuronas espinales^{15,16}. Por lo tanto, los indicios actuales parecen situar el foco, o lugar de adaptación en ciertas estructuras tanto corticales (por ejemplo corteza motora primaria, corteza motora suplementaria...) como subcorticales (cuerpo calloso, cerebelo...).

Sin embargo, parte de la investigación más reciente apunta a que los aumentos de fuerza en la extremidad no entrenada podrían deberse a posibles adaptaciones en la corteza motora primaria (M1) ipsilateral¹⁷⁻²¹. La inmensa mayoría de los estudios que defienden esta teoría han utilizado la EMT. Dicha técnica nos permite estimular de forma no invasiva e indolora la corteza cerebral²². En combinación con registros electromiográficos (EMG) podemos obtener los denominados potenciales motores evocados (PME), señales eléctricas registradas en el músculo tras la aplicación de un pulso magnético en la corteza motora primaria a través de EMT. La amplitud de los PME refleja el estado de excitabilidad de todo el tracto corticoespinal, así como del balance excitatorio-inhibitorio de las interneuronas activadas inicialmente con la EMT²². Por lo tanto, un cambio en la respuesta evocada por la EMT estará indicando la existencia de una adaptación en alguna de las estructuras del tracto corticoespinal. Es por ello que el registro de PME

en la extremidad no entrenada tras periodos crónicos de entrenamiento de fuerza unilateral se utiliza para medir la influencia de este tipo de entrenamiento sobre el tracto corticoespinal que gobierna dicha extremidad y su posible relación con el efecto cruzado.

Tal y como se ha comentado anteriormente, en la actualidad, la hipótesis más aceptada es aquella que defiende que los principales y más importantes cambios se producen en la corteza motora no entrenada⁶. Dicha teoría aboga por un aumento en la excitabilidad del tracto corticoespinal no entrenado, posiblemente provocada por la activación ipsilateral repetida que tiene lugar durante el entrenamiento unilateral, lo que permitiría aumentar la eficacia de la descarga central eferente, provocando así un aumento en la capacidad de generar fuerza. Diversos estudios han tratado de testar dicha hipótesis; sin embargo, parece existir cierta falta de concordancia en los resultados obtenidos, tanto en la dirección de la respuesta (aumento/sin cambios en la amplitud de los PME) como en la magnitud del cambio y en la posible correlación de este con el aumento de rendimiento^{17–21,23–27}. En parte esta variabilidad de los estudios podría deberse a los distintos músculos testados o a las diferentes metodologías o situaciones en las que se lleva a cabo la medición de la excitabilidad del tracto corticoespinal.

Es por ello que el objetivo principal del presente trabajo es llevar a cabo una revisión sistemática de la literatura disponible con el fin de comprender la influencia del entrenamiento de fuerza unilateral sobre la excitabilidad del tracto corticoespinal que proyecta a la extremidad no entrenada. Además, se pretende arrojar luz sobre la posible relación existente entre los cambios que tienen lugar en la excitabilidad corticoespinal (EC) y el aumento de rendimiento tras periodos de entrenamiento. Por último, se realizará un análisis sobre los distintos enfoques metodológicos utilizados en la literatura especializada y su posible influencia en los resultados de las mediciones obtenidas con EMT.

Desarrollo

La presente revisión sigue las recomendaciones de los *Ítems de referencia para publicar revisiones sistemáticas y metanálisis: la declaración PRISMA* (PRISMA-P)²⁸. En este estudio no se ha requerido la participación de humanos, por lo que no ha sido necesaria ninguna aprobación ética.

Estrategia de búsqueda

Se realizó una búsqueda sistemática de la literatura existente entre enero de 1970 hasta diciembre de 2016 en las bases de datos online Medline (vía PubMed), Ovid, Web of Science y Science Direct. Los términos de búsqueda utilizados fueron los siguientes: (*Transcranial magnetic stimulation* OR *excitability*) Y (*strength training* OR *resistance training* OR *force*) Y (*cross transfer* OR *contralateral limb* OR *cross education*). La misma estrategia de búsqueda fue utilizada por 2 autores independientes (DCP y SRA). En caso de necesitar datos transcendentales se contactó con los autores de los artículos incluidos.

Criterios de elegibilidad y selección de estudios

Una vez completada la búsqueda de literatura los artículos obtenidos en las 4 bases de datos fueron revisados en busca de repeticiones. Una vez las repeticiones fueron excluidas el resto de artículos se revisaron para determinar si cumplían los requisitos necesarios para su inclusión. La revisión preliminar de los artículos obtenidos consistió en el escrutinio de los títulos y resúmenes de cada uno de los artículos, excluyendo aquellos en los que el título o el resumen demostraran explícitamente que el artículo no cumplía con los requisitos para ser incluido. En el caso de que la lectura del título o el resumen no fueran suficientes para determinar la inclusión del artículo en la revisión, se examinó la versión completa del artículo. Se incluyeron ensayos aleatorizados solo si incluían medidas de EC medida en el hemisferio no entrenado, antes y después de un periodo de entrenamiento de fuerza unilateral de cualquier extremidad (dominante o no dominante, inferior o superior). La duración mínima de la intervención se estipuló en 2 semanas, y no se establecieron límites para la intensidad utilizada en el entrenamiento de fuerza. Se excluyeron artículos que incluyeran sujetos por debajo de 18 años, ancianos por encima de 65 años, o sujetos con cualquier tipo de trastorno neurológico, trastorno en las extremidades, lesiones ortopédicas o inmovilizaciones. Para garantizar que todos los criterios de inclusión fueran satisfechos, aquellos artículos potencialmente elegibles para su inclusión en la revisión fueron consensuados por 2 autores (DCP y GM).

Extracción y síntesis de los datos

Uno de los autores (DCP) extrajo la siguiente información de los artículos incluidos: autores y fecha de publicación, tamaño de la muestra y características (edad y lateralidad), grupo muscular entrenado, detalles del entrenamiento (duración, sesiones totales, volumen, intensidad y ejercicio ejecutado), variable clave (metodología utilizada para la medición de la EC) y resultados en relación únicamente con la variable clave.

Evaluación de la calidad

Para determinar la calidad metodológica de los estudios incluidos se utilizó la escala «PEDro» (<http://www.pedro.org.au>), la cual ha demostrado ser lo suficientemente fiable para su utilización en revisiones sistemáticas²⁹. La escala consiste en 11 criterios, de los cuales el primero no se ha incluido en la puntuación total. Cada criterio se ha evaluado con «sí» o «no», concediendo la puntuación de «sí» únicamente cuando el criterio se cumple claramente. La puntuación máxima que se puede obtener cuando se cumplen todos los criterios es 10. Los estudios incluidos con una puntuación PEDro $\geq 6/10$ se consideraron de alta calidad, mientras que aquellos con 5/10 o menos se consideraron de media o baja calidad metodológica. Dos autores (DCP y SRA) revisaron independientemente la calidad metodológica de los artículos.

Resultados

Resultados de búsqueda

Un total de 764 estudios fueron obtenidos tras la búsqueda inicial, de los cuales 11 fueron finalmente seleccionados para la revisión. El proceso completo de búsqueda se resume en la [figura 1](#).

Resultados de la evaluación de calidad

En la [tabla 1](#) se muestran las puntuaciones de calidad de cada uno de los estudios incluidos. El 60% de los estudios incluidos presentan una puntuación de calidad alta (≥ 6 puntos), mientras que el resto presentan una calidad media o baja (< 6 puntos) según la escala PEDRO.

Características de los participantes y los estudios

Toda la información relevante de cada estudio está resumida en la [tabla 2](#).

Las fechas de publicación de los 10 estudios oscilan entre 2011 y 2016. Todos los estudios incluidos fueron diseños pre-post y todos excepto uno²³ incluyeron un grupo control o un periodo control para las comparaciones. El tamaño de la muestra varía entre 4²⁶ y 34²⁴ sujetos (media 20,1, «n» total de todos los estudios: 201) e incluye hombres y mujeres en todos los estudios. Seis de los 10 estudios^{17,19–21,25,26} clasifican a los sujetos como «no entrenados», mientras que se desconoce el grado de entrenamiento en los otros 4 estudios^{18,23,24,27}. Todos los sujetos son diestros excepto 2 participantes, uno del estudio de Latella et al.²³ y otro del estudio de Urbin et al.²⁶. La edad de los participantes de todos los estudios oscila entre 18 y 35 años, excepto en el estudio de Urbin et al.²⁶, en el cual la edad de los sujetos es de $50 \pm 11,8$ años.

El periodo de entrenamiento de fuerza involucró las extremidades superiores en 7 de los 10 estudios^{17,20,21,23–26}, mientras que las extremidades inferiores fueron entrenadas en los otros 3^{18,19,27}. La duración del periodo de intervención fluctúa entre 3 y 8 semanas de entrenamiento y entre 9 y 24 sesiones de entrenamiento totales. En relación con el tipo de contracción, 8 de los 10 estudios utilizaron contracciones musculares dinámicas^{17–20,23,25–27}, mientras que en los otros 2 se realizaron contracciones isométricas^{21,24}. Todos los estudios incluidos utilizaron entrenamientos de fuerza de alta intensidad con intensidades de carga comprendidas entre el 70% de la repetición máxima (1 RM)²⁵ y contracciones máximas (isométricas o dinámicas)^{17,24}, siendo la intensidad más habitual de en torno a un 80% del rendimiento máximo (1 RM o contracción voluntaria isométrica máxima [CVM])^{18–21,23,26,27}.

Variable clave

Los cambios en la fuerza de la extremidad no entrenada como consecuencia del entrenamiento de fuerza unilateral no han sido considerados como variable clave en esta revisión, ya que revisiones sistemáticas con metaanálisis realizadas previamente han confirmado la eficacia de este

tipo de entrenamiento en la mejora de la fuerza de la extremidad no entrenada¹. Sin embargo, los resultados con respecto a los cambios en la fuerza en los artículos incluidos en esta revisión confirman los hallazgos previos en relación con la existencia del efecto cruzado de la fuerza tras periodos de entrenamiento de fuerza unilateral. Aunque no ha sido reflejado en la [tabla 2](#), todas las intervenciones realizadas en los estudios incluidos en la revisión alcanzaron mejoras significativas en el rendimiento de la extremidad no entrenada en comparación, tanto a los grupos control como al rendimiento previo a la intervención. La mejora de rendimiento en la extremidad no entrenada oscila entre el 6,4%²⁴ y el 61%²³, sin embargo, el límite superior puede haber sido influenciado por el uso de un espejo con el objetivo de generar una ilusión de movimiento en la extremidad no entrenada.

En lo que respecta a la EC e independientemente de la metodología utilizada para medirla, los resultados muestran un incremento de esta en 6 estudios^{17–21,23} (desde un 6% cuando la EC es medida con ambas extremidades en reposo, hasta un 63% y 62,3% de incremento en algunas de las medidas obtenidas durante contracción de la entrenada y la no entrenada, respectivamente), mientras que en los otros 4 no se dio ningún cambio en ninguna de las medidas obtenidas^{24–27}. La metodología utilizada para medir la variable clave es muy irregular. Una de las principales diferencias entre las metodologías utilizadas en los distintos estudios es la situación en la cual la EC fue valorada. Tres estudios la midieron con la extremidad no entrenada en reposo^{21,23,24}, 8 estudios mientras la extremidad no entrenada ejecutaba contracciones isométricas de baja intensidad^{17–20,24–27} y otros 2 estudios durante contracción de la extremidad entrenada^{21,23}. Tampoco el grado de contracción durante el cual se tomaron las medidas fue homogéneo, con contracciones que varían desde un 10% de la CVM^{18–20,24,27} o un 5% de la raíz media cuadrática de la EMG obtenida durante una CVM de la extremidad no entrenada^{17,25}, a un 20%, 60% y 80% de la CVM de la extremidad entrenada^{21,23}. Otro de los aspectos metodológicos que varían de un estudio a otro es la forma en la que se cuantifica la EC. La mayoría de los estudios realizaron una curva de reclutamiento en la que se obtuvieron las amplitudes de los PME con distintas intensidades de estimulación, desde la intensidad asociada al umbral motor o ligeramente por debajo, hasta diferentes porcentajes de la potencia del estimulador. Dos excepciones son el estudio de Zult et al.²³, en el que únicamente se obtuvieron las amplitudes de los PME a una intensidad de estimulación del 120% de la intensidad asociada al umbral motor, tanto durante reposo como durante contracción de la extremidad entrenada, o el caso de Kidgell et al.¹⁷ en el que aunque se realizó una curva de reclutamiento, solo se reportaron los resultados de los cambios en la amplitud de los PME obtenidos a una intensidad del 120% del umbral motor activo durante distintos grados de contracciones isométricas y dinámicas. Sin embargo, aunque la mayoría de los estudios incluidos llevaron a cabo una curva de reclutamiento, no todas las intensidades de estimulación utilizadas fueron las mismas. Cinco estudios basaron las distintas intensidades de estimulación en la potencia máxima del estimulador, con escalones que varían entre el 5% y el 10% de dicha potencia^{18–20,25,27}, mientras que otros utilizaron escalones de un 10%^{21,24} o un 20%^{17,26} de la intensidad asociada al umbral motor. Además,

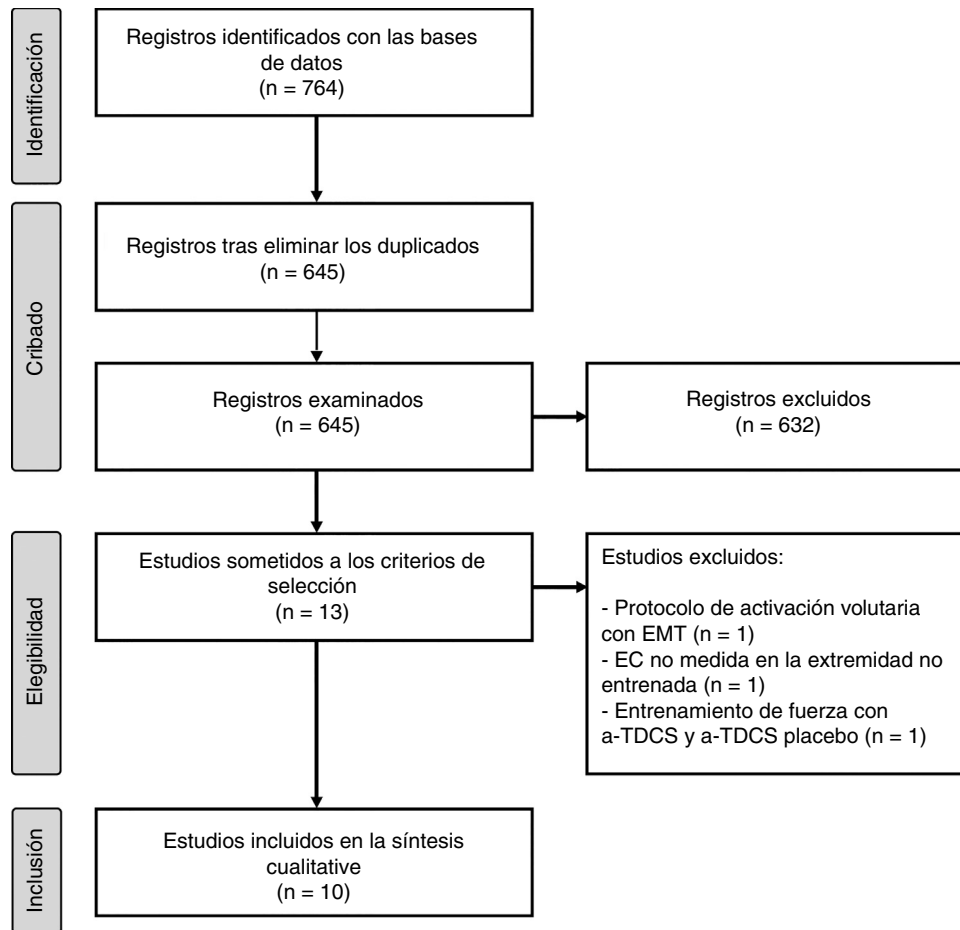


Figura 1 Diagrama de flujo de los estudios encontrados, excluidos e incluidos.

Tabla 1 Análisis sobre la calidad metodológica de los estudios incluidos

Artículo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Puntuación total
Hortobagyi et al. (2011) ²¹	S	S	N	N	N	N	N	S	S	S	S	5
Kidgell et al. (2011) ²⁰	S	S	N	S	N	N	N	S	S	S	S	6
Goodwill y Kidgell (2012) ¹⁹	S	S	N	S	N	N	N	S	S	S	S	6
Goodwill et al. (2012) ¹⁸	S	S	N	S	N	N	N	S	S	S	S	6
Latella et al. (2012) ²⁷	S	N	N	N	N	N	N	S	S	S	S	4
Kidgell et al. (2015) ¹⁷	S	S	N	S	N	N	S	S	S	S	N	6
Urbini et al. (2015) ²⁶	S	N	N	N	N	N	N	N	N	S	N	1
Coombs et al. (2016) ²⁵	S	S	N	S	N	N	S	S	S	S	S	7
Manca et al. (2016) ²⁴	S	S	N	N	N	N	S	S	S	S	N	5
Zult et al. (2016) ²³	S	S	N	S	N	N	N	S	S	S	S	6

N: no cumple el criterio; S: cumple el criterio; 1: la asignación es aleatoria; 2: la asignación es oculta; 3: los grupos son similares antes de la intervención con respecto a la variable clave; 4: los sujetos fueron cegados con respecto a la asignación de grupo; 5: los terapeutas fueron cegados con respecto a la pertenencia de un sujeto a un grupo u otro; 6: los evaluadores fueron cegados con respecto a la pertenencia de un sujeto a un grupo u otro; 7: las medidas de la variable clave fueron obtenidas en al menos el 85% de la muestra; 8: análisis del tipo de intención de tratar; 9: comparaciones estadísticas entre los grupos; 10: medida de variabilidad y punto de medida.

tampoco todos los estudios llevaron a cabo el mismo análisis de los datos obtenidos en la curva de reclutamiento. Uno de los estudios midió el cambio de la media de las amplitudes de todos los PME obtenidos durante todas las intensidades empleadas en la curva de reclutamiento²¹. Otros midieron el cambio en la amplitud de los PME obtenidos a

intensidades de estímulo concretas, siendo la intensidad equivalente al UM, el 120% de esta, un 20% de la potencia máxima del estimulador por encima del UM, o los cambios en la amplitud máxima de los PME obtenidos los valores concretos más utilizados^{17,18,20,23–25,27}. Finalmente, otros realizaron la ecuación sigmoidea no lineal de Boltzman y midieron

Tabla 2 Características de los resultados incluidos en el estudio

Autor/año	Muestra	Músculo entrenado	Intervención	Variable clave: EC en extremidad no entrenada	Resultados
Hortobagyi et al. (2011) ²¹	N = 20, 30,9 ± 1,4 años, diestros	PDI derecho	8 S, 20 E	CR obtenida durante reposo desde el 90% hasta el 160% de la intensidad correspondiente al UMR (escalones de un 10%)	GE:
	GE (n = 12)		Abducción isométrica del dedo índice: 5 × 10 al 80% de CVIM	Cambio medio en las amplitudes de los PME obtenidos en cada intensidad de la CR	Cambio medio de la amplitud de todos los PME obtenidos durante la CR en reposo: +6% de la 1.ª a la última sesión (p = 0,010)
	GC (n = 8)		Tiempo controlado: 5'' contracción-5'' descanso	Amplitud de los PME obtenida con el 120% de la intensidad correspondiente al UMR durante contracción de la extremidad entrenada de un 20% de la CVIM	Amplitud de los PME con el 120% del UMR durante contracciones del 20% de la CVIM: +10,3 ± 2,3% de la primera a la última sesión (p = 0,001).
				Amplitud de los PME obtenida con el 160% de la intensidad correspondiente al UMR durante contracción de la extremidad entrenada de un 80% de la CVIM	Amplitud de los PME con el 160% del UMR durante contracciones del 80% de la CVIM: +63,9 ± 8,4% de la primera a la última sesión (p = 0,001).
Kidgell et al. (2011) ²⁰	N = 23, diestros	BB derecho	4 S, 12 E	CR obtenida durante el 10% de la CVIM. Desde el 5% de la MPE por debajo de la intensidad correspondiente al UMA hasta el PME máximo (escalones del 5% de la MPE)	GC: sin cambios significativos
	GE (n = 13, 22.4 ± 3.2 años)		Flexión dinámica de codo: 4x6-8 al 80% de la 1RM	Cambio medio en las amplitudes de los PME obtenidos en cada intensidad de la CR	GE:
	GC (n = 10), 28,3 ± 7,05 años		Tiempo controlado: 3'' CON-4'' EXC	Amplitud de los PME obtenida con el 160% de la intensidad correspondiente al UMR durante contracción de la extremidad entrenada de un 20% de la CVIM	Amplitud de los PME en el UMA: +30,3% (p = 0,03)
				Valores de la máxima amplitud, la V50 y la pendiente de la CR	Amplitud de los PME obtenidos con un 20% de la MPE por encima del UMA: +33% (p = 0,05)

Tabla 2 (Continued)

Autor/año	Muestra	Músculo entrenado	Intervención	Variable clave: EC en extremidad no entrenada	Resultados
Goodwill y Kidgell (2012) ¹⁹	N = 14, diestros	RF derecho	3 S, 9 E	CR obtenidas durante contracciones del 10% de la CVIM, desde el 10% de la MPE por debajo de la intensidad correspondiente al UMA hasta el 40% de la MPE por encima de la intensidad del UMA (escalones del 5% de la MPE)	GE: Sin cambios significativos en la pendiente y la V50 ($p > 0,05$) Máxima amplitud: +32% ($p < 0,05$) GC: sin cambios significativos
	GE ($n = 7,21 \pm 1,1$ años) GC ($n = 7,21 \pm 1,2$ años)		Sentadillas unilaterales: $4 \times 6-8$ al 75-80% de la 1RM Tiempo controlado: 3'' CON- 4'' EXC	Valores de la máxima amplitud, la V50 y la pendiente pico de la CR	
Goodwill et al. (2012) ¹⁸	N = 14, diestros	RF derecho	3 S, 9 E	CR obtenidas durante contracciones del 10% de la CVIM, desde la intensidad correspondiente al UMA hasta el 40% de la MPE por encima de la intensidad del UMA (escalones del 5% de la MPE)	GE: Sin cambios significativos en la amplitud de los PME a la intensidad del UMA, en la V50 y en la pendiente Amplitud de los PME obtenidos con un 20% de la MPE por encima del UMA: +62,3% ($p = 0,003$) Amplitud de los PME _{max} : +34,9% ($p < 0,01$) Máxima amplitud: +29,1% ($p = 0,001$) GC: sin cambios significativos
	GE ($n = 7,21 \pm 1,1$ años) GC ($N = 7,21 \pm 1,2$ años)		Sentadillas unilaterales: $4 \times 6-8$ al 80% de la 1RM Tiempo controlado: 3'' CON-4'' EXC	Cambios medios en la amplitud de los PME a la intensidad correspondiente al UMA, un 20% de la MPE por encima del UMA y de los PME _{max} Valores de la máxima amplitud, la V50 y la pendiente pico de la CR	
Autor/año	Muestra	Músculo entrenado	Intervención	Variable clave: EC en extremidad no entrenada	Resultados
Latella et al. (2012) ²⁷	N = 18, 18-35 años, diestros (excepto 1)	RF derecho	8 S, 24 E	CR obtenidas durante una contracción de un 10% desde la intensidad correspondiente al UMA hasta la MPE (escalones del 5% de la MPE)	Sin cambios significativos en ninguna de las variables clave medidas en ningún grupo
	GE (n = 9) GC (n = 9)		Prensa de pierna: S 1 y 5: 3×8 al 78% de la 1RM S 2 y 6: 3×6 al 83,5% de la 1RM S 3 y 7: 3×4 al 88,5% de la 1RM S 4 y 8: descarga, 3×12 al 70% de la 1RM Tiempo desconocido	Cambios medios en la amplitud de los PME a la intensidad correspondiente al UMA, un 20% de la MPE por encima del UMA y de los PME _{max}	

Tabla 2 (Continued)

Autor/año	Muestra	Músculo entrenado	Intervención	Variable clave: EC en extremidad no entrenada	Resultados
Kidgell et al. (2015) ¹⁷	N = 27, 26 ± 1,5 años, diestros Entrenamiento EXC (GEE, n = 9) Entrenamiento CON (GEC n = 9) GC (n = 9)	FRC derecho	4S, 12 E Flexiones de muñeca: 4 × 6-8, 20°/s, concéntricas o excéntricas a la máxima intensidad	CR obtenidas durante una contracción de un 5% de la raíz media cuadrática de la máxima EMG, desde el 90% de la intensidad correspondiente al UMA hasta el 230% de dicha intensidad (escalones del 20% de la intensidad correspondiente al UMA) Amplitud de los PME al 120% de la intensidad correspondiente al UMA durante contracciones isométricas del 5, 20 y 40% de la CVIM y del 40% del torque concéntrico y excéntrico	Amplitud de los PME al 120% de la intensidad correspondiente al UMA durante: Contracciones isométricas: sin cambios significativos en ningún grupo Contracciones EXC: +51% significativo en GEE en comparación al resto de grupos (p < 0,05). Sin cambios significativos en el resto de grupos Contracciones CON: sin cambios significativos en ningún grupo
Autor/año	Muestra	Músculo entrenado	Intervención	Variable clave: EC en extremidad no entrenada	Resultados
Urbin et al. (2015) ²⁶	N = 4, 50 ± 11,8 años, diestros y zurdos GE (n = 4) GC (n = 4) ^a	ECD dominante y no dominante	4S, 16 E Extensión de muñeca dinámica: 6 × 6-8 al 80% de la 1RM Tempo controlado: 3'' CON – 4'' EXC	CR durante contracción de fondo de intensidad desconocida desde el 90% de la intensidad correspondiente al UMR hasta el 150% de dicha intensidad (escalones del 20% de la intensidad correspondiente al UMR) Valor medio de la pendiente de la CR Curvas de reclutamiento durante contracción de un 5% de la raíz media cuadrática de la EMG máxima, desde la intensidad correspondiente al UMA hasta el 40% de la MPE por encima de la intensidad correspondiente al UMA (escalones del 10% del UMA)	Sin cambios significativos en ningún periodo de tiempo (periodo control y periodo de intervención)
Coombs et al. (2016) ²⁵	N = 23 Diestros GE-diestros (RHT, n = 8, 22,2 ± 2,06 años) GE-zurdos (LHT n = 8, 21,0 ± 2,21 años) GC (n = 7, 25,2 ± 2,06 años)	ERC dominante	3S, 9 E Extensión de muñeca dinámica: 4 × 6-8 al 70% de la 1RM Tempo controlado: 3'' CON-4'' EXC	Amplitud de los PME al 10%, 20%, 30%, 40% de la MPE por encima de la intensidad correspondiente al UMA	Sin cambios significativos en ninguna variable de ninguno de los grupos

Tabla 2 (Continued)

Autor/año	Muestra	Músculo entrenado	Intervención	Variable clave: EC en extremidad no entrenada	Resultados
Manca et al. (2016) ²⁴	N = 34, 25,5 ± 6,0 años, diestros	PDI derecho	4 S, 12 E	UMA durante contracción del 10% de la CVIM	Sin cambios significativos en ninguna variable de ninguno de los grupos
	GE (n = 17)		Pelliccos isométricos: 5 × 10 CVIM	CR durante reposo desde el 90% de la intensidad correspondiente al UMR al 150% de dicha intensidad.	
	GC (n = 17)		Tiempo controlado: 5'' contracción-5'' descanso		
Zult et al. (2016) ²³	N = 24, diestros	FRC derecho	3 S, 15 S	Amplitud de los PME producidos con una intensidad de estimulación del 120% de la intensidad correspondiente al UMR en reposo y durante la contracción de la extremidad entrenada de un 60% de la CVIM dinámica (con reflejo y sin reflejo en el espejo)	Sin cambios significativos en la amplitud de los PME medidos en reposo en ninguno de los grupos
	GE entrenamiento sin espejo (GESE, n = 12, 29 ± 9 años)		Flexiones dinámicas de muñeca: 6 × 8 al 80% de la CVIM dinámica		Cambios significativos en ambos grupos en la amplitud de los PME medidos durante contracción de la extremidad entrenada tanto en la condición con reflejo (+55%) como sin reflejo (+49%) en el espejo (p < 0,05)
	GE entrenamiento con espejo (GECE, n = 12, 25 ± 4 años)		Tiempo desconocido		

BB: bíceps braquial; CON: concéntrico; CR: curva de reclutamiento; CVIM: contracción voluntaria isométrica máxima; E: entrenamientos; EC: excitabilidad corticoespinal; ECD: extensor común de los dedos; ERC: extensor radial del carpo; EXC: excéntrico; FRC: flexor radial del carpo; GC: grupo control; GE: grupo experimental; MPE: máxima potencia del estimulador; PDI: primer dorsal interóseo; PME: potencial motor evocado; PME_{max}: potencial motor evocado máxima; 1 RM: repetición máxima; RF: recto femoral; S: semanas; UMA: umbral motor activo; UMR: umbral motor en reposo; V50: intensidad de estímulo necesaria para obtener un PME de una amplitud a medio camino entre la amplitud máxima y la mínima.

^a Mismo grupo con periodo control sin entrenamiento.

cambios en la amplitud máxima obtenida de los PME, en la V50 (que hace referencia a la intensidad de estímulo necesaria para obtener un PME de una amplitud a medio camino entre la amplitud máxima y la mínima) y la pendiente de la curva obtenida^{18–20}.

Discusión

La presente revisión tiene el objetivo de determinar el impacto del entrenamiento de fuerza unilateral sobre la EC del hemisferio no entrenado. Aunque los resultados de los estudios incluidos presentan cierta variabilidad, parece existir cierta tendencia hacia el aumento de la excitabilidad del tracto corticoespinal que gobierna la extremidad no entrenada tras un periodo de entrenamiento crónico de al menos 3 semanas, tal y como muestran la mayoría de los artículos incluidos^{17–21,23} (6 de 10).

Diversos estudios han demostrado que contracciones unilaterales producen una potenciación en los PME generados en el hemisferio ipsilateral, un fenómeno conocido como facilitación cruzada^{11–14,30}. Dicha facilitación cruzada

parece tener un origen cortical, probablemente debido a las conexiones transcallosas o interhemisféricas entre ambas M1, puesto que dicha facilitación ha sido observada únicamente cuando los PME son generados mediante EMT y no mediante la estimulación directa de los axones corticoespirales a través de la unión cervicomedular^{14,30}. Se piensa que esta facilitación cruzada podría ser el origen del aumento crónico que se da en la EC ipsilateral tras periodos crónicos de entrenamiento unilateral. Este aumento crónico en la EC podría deberse a cambios en las propiedades de las membranas de las neuronas corticoespirales o a aumentos en la eficacia de las sinapsis excitatorias hacia dichas neuronas, resultando así en una potenciación de las proyecciones corticomotoras^{19,21}. Sin embargo, ninguno de los estudios incluidos lleva a cabo medidas que permitan descartar que la modulación de los potenciales motores evocados con EMT tras un periodo de entrenamiento no se deba a cambios a nivel espinal. Por tanto, aunque otros estudios no han encontrado cambios en la excitabilidad de las motoneuronas medida mediante reflejo H en el miembro no entrenado tras periodos de entrenamiento unilateral^{15,16}, no se puede afirmar con rotundidad que este aumento en la EC se deba únicamente a adaptaciones corticales.

Se ha sugerido que este aumento en la EC podría tener una relación causal con el incremento de fuerza experimentado por los miembros no entrenados¹⁷⁻²¹. Sin embargo, es importante destacar que una gran parte de los estudios incluidos no reportan cambios en la EC²⁴⁻²⁷, mientras que el aumento de fuerza en la extremidad no entrenada sí que ocurre tras todas las intervenciones incluidas, lo que sugiere que ambas variables podrían no estar relacionadas. Sin embargo, varios factores de dichos estudios podrían haber influido en la ausencia de cambio en la EC. Por ejemplo, la especificidad de la tarea en la que se pretenden medir posibles cambios neurales con respecto a la tarea utilizada durante el entrenamiento parece ser determinante a la hora de medir dichas adaptaciones^{31,32}, por lo que en el estudio de Latella et al.²⁷ la ausencia de cambio en la EC podría ser consecuencia de una falta de especificidad entre el ejercicio utilizado durante el entrenamiento (prensa de piernas, ejercicio multiarticular) y el ejercicio en el que posteriormente se midió la EC (extensión de rodilla, ejercicio monoarticular). En el caso de Manca et al.²⁴ reportan un aumento de fuerza en el miembro no entrenado de un 6,4%, una magnitud que puede parecer discreta en comparación con los aumentos de otros de los estudios incluidos en esta revisión^{17-21,23}. Este pequeño aumento en la fuerza de la extremidad no entrenada podría haber limitado los cambios en la EC del músculo testado puesto que, como sugieren los autores, el aumento de fuerza también podría ser consecuencia de una mejora en la activación de otros músculos estabilizadores de la muñeca. Otro de los estudios en los cuales no se dieron cambios en la EC tras un periodo de entrenamiento de fuerza unilateral es el estudio de Urbin et al.²⁶. En este únicamente se sometió a pruebas a 4 individuos, por lo que esta escasa muestra podría haber provocado que los posibles cambios en el tracto corticoespinal hubieran pasado desapercibidos. Finalmente, en el caso de Coombs et al.²⁵ la única posible explicación sería el escaso número de sesiones realizadas, sin embargo, tradicionalmente se ha sugerido que las adaptaciones neurales son aquellas responsables del aumento de la fuerza tras las primeras sesiones de entrenamiento, además de que en tan solo 9 sesiones reportan aumentos de fuerza de entre un 10% y un 15%.

Sin embargo, aunque los factores anteriormente comentados podrían haber afectado a la ausencia de cambio en la EC, también es probable que la ausencia de cambio en estos estudios esté sugiriendo una posible falta de relación funcional entre el aumento de fuerza en la extremidad no entrenada y el incremento en la EC que gobierna dicha extremidad. De hecho, en 2 de los 6 estudios en los que se da un aumento en alguna de las medidas de EC obtenidas, los resultados sugieren que esta podría no estar relacionada con los aumentos de rendimiento^{17,23}. Un claro ejemplo de esto es el estudio de Kidgell et al.¹⁷ en el que se incluyeron 3 grupos, un grupo control, otro grupo que entrenó concéntricamente y otro grupo que entrenó excéntricamente. Los resultados mostraron que el grupo que realizó contracciones excéntricas demostró una mayor mejora de rendimiento frente al grupo concéntrico, tanto en la CVM (43% vs 11%), como en el torque máximo isocinético concéntrico (49% vs 28%) y excéntrico (47% vs 14%), lo que concuerda con hallazgos previos que muestran un mayor efecto cruzado cuando el entrenamiento se basa en contracciones excéntricas³³. Sin embargo,

aunque la EC se midió durante contracciones isométricas, concéntricas y excéntricas, el único aumento significativo de todas las medidas de EC tomadas fue aquel obtenido durante contracciones excéntricas en el grupo que entrenó con contracciones excéntricas. Este hecho, aunque ciertamente sugiere cierta especificidad entre la situación en la que se mide la EC y el movimiento entrenado, pone en evidencia que el grupo que entrenó con contracciones excéntricas, el cual también obtuvo mejoras en el rendimiento isométrico y concéntrico de la extremidad no entrenada, no experimentó ningún cambio en la EC medida en dichas situaciones. Asimismo, también el grupo que entrenó con contracciones concéntricas obtuvo mejoras en la fuerza máxima aplicada durante contracciones concéntricas en el miembro no entrenado, sin ningún tipo de cambio en la EC medida en dicha situación.

Otro ejemplo de la incongruencia existente entre los cambios en la EC y las mejoras de fuerza del miembro no entrenado lo aporta el estudio de Zult et al.²³. En este estudio 2 grupos llevaron a cabo un entrenamiento basado en flexiones dinámicas de muñeca contra una resistencia equivalente al 60% de 1 RM. A uno de los grupos se le colocó un espejo entre ambas muñecas de tal forma que el sujeto podía ver reflejada la imagen de la extremidad entrenada, generando así la ilusión de movimiento en la extremidad en reposo, mientras que el otro grupo no obtuvo *feedback* visual de ningún tipo. Los resultados muestran cómo ambos grupos experimentaron aumentos similares en la excitabilidad de la M1 no entrenada medida durante contracción del miembro entrenado. Sin embargo, los datos relativos al aumento de fuerza de la extremidad no entrenada muestran que el grupo que entrenó con espejo obtuvo mayores mejoras (61% vs 34%), lo que muestra que esta mayor transferencia de rendimiento a la extremidad no entrenada no estuvo acompañada de una mayor adaptación en la excitabilidad de la M1 no entrenada.

En esta misma línea, tan solo 2 estudios han reportado análisis de correlación entre los datos relativos a la fuerza y los relativos a la EC con cierta controversia en los resultados^{20,21}. En el caso de Kidgell et al.²⁰ reportaron una correlación moderada ($r=0,57$, $p=0,04$) entre el aumento de fuerza en la extremidad no entrenada y la EC medida durante contracción de dicha extremidad, mientras que en el caso de Hortobagyi et al.²¹ observaron una ausencia de correlación ($r=0,20$, $p=0,293$) entre ambas variables cuando la EC se medía durante el reposo. El resto de los estudios incluidos en esta revisión no reporta ninguna medida de correlación entre los datos relativos a la fuerza y los relativos a la EC, lo que sugiere que ninguna correlación estadística fue encontrada. También es importante destacar que en el caso de Hortobagyi et al.²¹ sí que observaron cierta correlación entre el aumento de fuerza de la extremidad no entrenada y el aumento de la amplitud de los PME obtenidos tras la estimulación de la M1 no entrenada durante contracción de la extremidad entrenada. Puesto que la medición de la EC en esta situación no es muy específica con respecto a la situación en la que se da un cambio en el rendimiento, lo que sugiere probablemente esta correlación es que cuanto mayor es la actividad de la M1 «en reposo», como consecuencia de la contracción del miembro que entrena (ipsilateral), y por tanto mayor el tamaño de los PME

obtenidos, mayor es el estímulo que está recibiendo dicho hemisferio (no únicamente la M1, ni únicamente las estructuras testadas por un pulso simple de EMT), por lo que podría esperarse un mayor grado de mejora en el miembro no entrenado.

Por tanto, es posible que el efecto cruzado no se deba exclusivamente a adaptaciones localizadas específicamente en la M1 ipsilateral y que, efectivamente, los cambios puedan darse en otras zonas de la corteza cerebral ipsilateral con conexiones directas o indirectas con la M1³⁴ o incluso a nivel espinal³⁵. De hecho, zonas como el área motora suplementaria, las regiones sensitivas, la corteza prefrontal, premotora, cingulada y la parietal o el cerebelo han demostrado cierta activación bilateral durante contracciones unilaterales³⁶, por lo que dicha activación cruzada de forma repetida podría derivar en adaptaciones crónicas. En esta línea se encuentran los resultados de Farthing et al.⁹, los cuales observaron que un entrenamiento unilateral del flexor ulnar del carpo provocó un aumento de fuerza en la extremidad no entrenada de un 47,1%, junto con un cambio en el patrón de activación cortical durante la ejecución del ejercicio medido con resonancia magnética funcional. Concretamente, los resultados tras el entrenamiento mostraron una mayor activación durante contracción del miembro no entrenado del córtex sensorio motor contralateral y las regiones del lóbulo temporal ipsilateral, zonas relacionadas con el aprendizaje motor³⁷. Estos resultados confirman la posibilidad de que las adaptaciones que subyacen al aumento de fuerza en la extremidad no entrenada pudieran deberse a cambios en otras zonas distintas del córtex relacionadas con la planificación del acto motor^{34,38}. Sin embargo, se necesita más investigación con el fin de poder localizar otras posibles zonas de adaptación distintas a la M1.

Por otro lado, es posible que se den otras adaptaciones en estructuras de la M1 distintas de aquellas relacionadas con la generación de PME tras un pulso simple con EMT. Por ejemplo, posibles cambios en el balance excitatorio-inhibitorio de los circuitos intracorticales de la M1, a través de disminuciones en la excitabilidad de las interneuronas inhibitorias GABAérgicas, puedan estar influyendo también en el efecto cruzado del entrenamiento unilateral. De hecho, parece existir evidencia que demuestra cierta reducción de la inhibición intracortical tras periodos de entrenamiento de fuerza unilateral^{17,18}, tanto en el hemisferio entrenado como en el no entrenado, lo que sugiere que cambios en la eficacia sináptica entre interneuronas inhibitorias y neuronas corticoespinales podrían estar influyendo en el aumento de fuerza.

Ahora bien, los resultados de la presente revisión muestran una gran variabilidad en la metodología utilizada para medir cambios en la EC, por lo que no se puede descartar que la ausencia de cambios en la EC pueda deberse a aspectos metodológicos en la medición de esta variable. Tal y como previamente se ha desglosado en los resultados, una de las principales variaciones en la medición de la EC es la situación en la que se mide. Se ha sugerido previamente que para detectar posibles adaptaciones neurofisiológicas tras un entrenamiento, la tarea en la cual se llevan a cabo las medidas debe ser similar, si no igual, a la tarea llevada a cabo durante el entrenamiento^{31,32}.

Por tanto, parece lógico que las medidas sobre EC deban ser tomadas durante contracción del músculo en el cual se pretenden observar los posibles cambios, ya que de esta forma las estructuras de la M1 testadas se encuentran en una situación similar a aquella en la que se ha demostrado un aumento de rendimiento. Por otro lado, testar la EC del hemisferio no entrenado durante contracción del hemisferio entrenado puede ser una muestra del nivel de activación cruzada que se está dando en el hemisferio supuestamente inactivo, reflejando así el estímulo de entrenamiento que dicho hemisferio (la M1 ipsilateral u otras zonas con influencia sobre la M1 ipsilateral) está recibiendo. Sin embargo, esta situación, aunque puede ser útil para medir posibles cambios en el grado de activación cruzada, y por tanto en el estímulo de entrenamiento que recibe el hemisferio no entrenado, se aleja de la situación concreta en la que se está midiendo un cambio de rendimiento. Por otra parte, sería interesante determinar si la especificidad únicamente afecta al ejercicio y al tipo de contracción, o si también puede tener cierto efecto la intensidad de contracción durante la que se mide la EC, ya que todos los estudios incluidos realizan curvas de reclutamiento, o incluso medidas a una intensidad de estimulación única, durante contracciones de muy baja intensidad (10% CVM o 5% de la raíz media cuadrática de la EMG máxima)^{17–20,24–27}. Por otro lado, la comparación de los resultados puede resultar complicada si las medidas sobre las cuales se basan los posibles cambios en la EC no son similares, habiendo estudios que reportan los cambios de la amplitud de los PME tomados a distintas, o incluso a una única intensidad de estimulación, mientras que otros reportan medidas como la pendiente pico, la V50 o la el punto más alto de la curva obtenida tras realizar la ecuación sigmoideal no lineal de Boltzmann^{18–20}.

Conclusión

En definitiva, parece existir cierta controversia en los resultados en relación con el aumento de la EC en el hemisferio no entrenado tras el entrenamiento de fuerza unilateral. El 60% de los estudios encuentra un aumento en la EC de la M1 no entrenada, mientras que el 40% no encuentra cambios significativos en dicho parámetro. Además, los resultados sugieren que rendimiento y cambios en la EC podrían no estar relacionados. Por tanto, aunque no se puede descartar que la ausencia de cambio en la EC pueda deberse a variaciones o limitaciones metodológicas de algunos estudios, tampoco parece incoherente pensar que las adaptaciones que subyacen al efecto cruzado del entrenamiento de fuerza unilateral puedan deberse a cambios en otras zonas del hemisferio no entrenado relacionadas con la planificación del movimiento, o incluso a cambios en estructuras de la M1 distintas de las que determinan/afectan el tamaño de los PME obtenidos con un pulso simple de EMT. Para concluir, la influencia del entrenamiento unilateral crónico sobre la EC del hemisferio no entrenado sigue siendo dudosa. Es por ello que futuras investigaciones deberían ahondar en esta cuestión mediante metodologías que aboguen por una mayor especificidad en las condiciones de medición y una mayor homogeneidad y detalle en las medidas obtenidas, así como posibles análisis de correlación entre los aumentos de fuerza

y los cambios en la EC, con el fin de determinar una posible relación funcional.

Financiación

Este estudio ha sido financiado por el Ministerio Español de Economía, Industria y Competitividad (referencia del proyecto: PSI2015-71061-P).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

- Munn J, Herbert RD, Gandevia SC. Contralateral effects of unilateral resistance training: A meta-analysis. *J Appl Physiol* (1985). 2004;96:1861–6.
- Munn J, Herbert RD, Hancock MJ, Gandevia SC. Training with unilateral resistance exercise increases contralateral strength. *J Appl Physiol* (1985). 2005;99:1880–4.
- Zhou S. Chronic neural adaptations to unilateral exercise: Mechanisms of cross education. *Exerc Sport Sci Rev*. 2000;28:177–84.
- Hortobagyi T. Cross education and the human central nervous system. *IEEE Eng Med Biol Mag*. 2005;24:22–8.
- Carroll TJ, Herbert RD, Munn J, Lee M, Gandevia SC. Contralateral effects of unilateral strength training: Evidence and possible mechanisms. *J Appl Physiol* (1985). 2006;101:1514–22.
- Lee M, Carroll TJ. Cross education: Possible mechanisms for the contralateral effects of unilateral resistance training. *Sports Med*. 2007;37:1–14.
- Houston ME, Froese EA, Valeriote SP, Green HJ, Ranney DA. Muscle performance, morphology and metabolic capacity during strength training and detraining: A one leg model. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*. 1983;51:25–35.
- Ploutz LL, Tesch PA, Biro RL, Dudley GA. Effect of resistance training on muscle use during exercise. *J Appl Physiol* (1985). 1994;76:1675–81.
- Farthing JP, Borowsky R, Chilibeck PD, Binsted G, Sarty GE. Neuro-physiological adaptations associated with cross-education of strength. *Brain Topogr*. 2007;20:77–88.
- Beyer KS, Fukuda DH, Boone CH, Wells AJ, Townsend JR, Jajtner AR, et al. Short-term unilateral resistance training results in cross education of strength without changes in muscle size, activation, or endocrine response. *J Strength Cond Res*. 2016;30:1213–23.
- Stedman A, Davey NJ, Ellaway PH. Facilitation of human first dorsal interosseous muscle responses to transcranial magnetic stimulation during voluntary contraction of the contralateral homonymous muscle. *Muscle Nerve*. 1998;21:1033–9.
- Muellbacher W, Facchini S, Boroojerdi B, Hallett M. Changes in motor cortex excitability during ipsilateral hand muscle activation in humans. *Clin Neurophysiol*. 2000;111:344–9.
- Stinear CM, Walker KS, Byblow WD. Symmetric facilitation between motor cortices during contraction of ipsilateral hand muscles. *Exp Brain Res*. 2001;139:101–5.
- Hortobagyi T, Taylor JL, Petersen NT, Russell G, Gandevia SC. Changes in segmental and motor cortical output with contralateral muscle contractions and altered sensory inputs in humans. *J Neurophysiol*. 2003;90:2451–9.
- Lagerquist O, Zehr EP, Docherty D. Increased spinal reflex excitability is not associated with neural plasticity underlying the cross-education effect. *J Appl Physiol* (1985). 2006;100:83–90.
- Fimland MS, Helgerud J, Solstad GM, Iversen VM, Leivseth G, Hoff J. Neural adaptations underlying cross-education after unilateral strength training. *Eur J Appl Physiol*. 2009;107:723–30.
- Kidgell DJ, Frazer AK, Daly RM, Rantalainen T, Ruotsalainen I, Ahtiainen J, et al. Increased cross-education of muscle strength and reduced corticospinal inhibition following eccentric strength training. *Neuroscience*. 2015;300:566–75.
- Goodwill AM, Pearce AJ, Kidgell DJ. Corticomotor plasticity following unilateral strength training. *Muscle Nerve*. 2012;46:384–93.
- Goodwill AM, Kidgell DJ. The effects of whole-body vibration on the cross-transfer of strength. *Sci World J*. 2012;2012:504837.
- Kidgell DJ, Stokes MA, Pearce AJ. Strength training of one limb increases corticomotor excitability projecting to the contralateral homologous limb. *Motor Control*. 2011;15:247–66.
- Hortobagyi T, Richardson SP, Lomarev M, Shamim E, Meunier S, Russman H, et al. Interhemispheric plasticity in humans. *Med Sci Sports Exerc*. 2011;43:1188–99.
- Hallett M. Transcranial magnetic stimulation and the human brain. *Nature*. 2000;406:147–50.
- Zult T, Goodall S, Thomas K, Solnik S, Hortobagyi T, Howatson G. Mirror training augments the cross-education of strength and affects inhibitory paths. *Med Sci Sports Exerc*. 2016;48:1001–13.
- Manca A, Ginatempo F, Cabboi MP, Mercante B, Ortu E, Dragone D, et al. No evidence of neural adaptations following chronic unilateral isometric training of the intrinsic muscles of the hand: a randomized controlled study. *Eur J Appl Physiol*. 2016;116:1993–2005.
- Coombs TA, Frazer AK, Horvath DM, Pearce AJ, Howatson G, Kidgell DJ. Cross-education of wrist extensor strength is not influenced by non-dominant training in right-handers. *Eur J Appl Physiol*. 2016;116:1757–69.
- Urbán MA, Harris-Love ML, Carter AR, Lang CE. High-intensity, unilateral resistance training of a non-paretic muscle group increases active range of motion in a severely paretic upper extremity muscle group after stroke. *Front Neurol*. 2015;6:119.
- Latella C, Kidgell DJ, Pearce AJ. Reduction in corticospinal inhibition in the trained and untrained limb following unilateral leg strength training. *Eur J Appl Physiol*. 2012;112:3097–107.
- Moher D, Shamseer L, Clarke M, Ghera D, Liberati A, Petticrew M, et al. Preferred reporting items for systematic review and meta-analysis protocols (PRISMA-P) 2015 statement. *Syst Rev*. 2015;4:1.
- Maher CG, Sherrington C, Herbert RD, Moseley AM, Elkins M. Reliability of the PEDro scale for rating quality of randomized controlled trials. *Phys Ther*. 2003;83:713–21.
- Carson RG, Riek S, Mackey DC, Meichenbaum DP, Willms K, Forner M, et al. Excitability changes in human forearm corticospinal projections and spinal reflex pathways during rhythmic voluntary movement of the opposite limb. *J Physiol*. 2004;560(Pt 3):929–40.
- Beck S, Taube W, Gruber M, Amtage F, Gollhofer A, Schubert M. Task-specific changes in motor evoked potentials of lower limb muscles after different training interventions. *Brain Res*. 2007;1179:51–60.
- Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson P, Dyhre-Poulsen P. Neural adaptation to resistance training: changes in evoked V-wave and H-reflex responses. *J Appl Physiol* (1985). 2002;92:2309–18.
- Hortobagyi T, Lambert NJ, Hill JP. Greater cross education following training with muscle lengthening than shortening. *Med Sci Sports Exerc*. 1997;29:107–12.
- Ruddy KL, Carson RG. Neural pathways mediating cross education of motor function. *Front Hum Neurosci*. 2013;7:397.

35. Dragert K, Zehr EP. Bilateral neuromuscular plasticity from unilateral training of the ankle dorsiflexors. *Exp Brain Res.* 2011;208:217–27.
36. Dai TH, Liu JZ, Sahgal V, Brown RW, Yue GH. Relationship between muscle output and functional MRI-measured brain activation. *Exp Brain Res.* 2001;140:290–300.
37. Grafton ST, Hazeltine E, Ivry R. Functional mapping of sequence learning in normal humans. *J Cogn Neurosci.* 1995;7: 497–510.
38. Farthing JP. Cross-education of strength depends on limb dominance: implications for theory and application. *Exerc Sport Sci Rev.* 2009;37:179–87.