
Detección de situaciones de fatiga local en tareas automatizadas

**J. M. Castellote
y col.**

Ayudas a la investigación 2009

Investigador Principal

J. M. Castellote

Dr. en Medicina y Cirugía
Investigador Titular, Instituto de Salud Carlos III, Madrid. España

Equipo Investigador

MEL van den Berg

Ph.D. en Medicina
Investigadora contratada, Instituto de Salud Carlos III, Madrid. España

J. Valls-Solé

Dr. en Medicina y Cirugía
Consultor Senior del Hospital Clínic, Barcelona. España

Índice

	Página
RESUMEN Y PALABRAS CLAVE	4
1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVO Y ALCANCE	4
3. MATERIALES Y METODOLOGÍA	4
4. RESULTADOS	5
5. DISCUSIÓN	6
6. CONCLUSIONES	7
7. AGRADECIMIENTOS	7
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	7

RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

La presente investigación pretende comprobar la influencia del estado muscular en la respuesta motora rápida a una sollicitación externa. Se sabe que la velocidad de ejecución de un movimiento balístico que incluye desplazamiento articular varía de acuerdo con el estado basal muscular. En el presente estudio razonamos que los tiempos motor y premotor pueden estar influenciados por el hecho de que el músculo haya estado antes en posición de reposo o manteniendo una contracción que origine fatiga.

Palabras clave: Prevención, riesgos en el trabajo, valoración de tecnologías, reposo, control motor.

1. INTRODUCCIÓN

En ciertas tareas tales como trabajar en cintas transportadoras, cadenas de montaje o empaquetado la exactitud en el gesto es un componente básico de la tarea. Son tareas que requieren la ejecución de actividades físicas de baja intensidad pero repetidas en el tiempo. Está constatado por diferentes investigaciones que estos trabajos, si se realizan en condiciones de fatiga, pueden provocar dolor, sobrecarga o daño muscular [1-4].

Los requerimientos de una tarea se comprenden mejor si se tiene una mayor comprensión de cómo ejecutamos las tareas y de cómo nuestro sistema perceptivo colabora en el reconocimiento de cambios en las condiciones de ejecución –fatiga, atención, discriminación– para así adaptar el patrón automatizado a las nuevas condiciones. La fatiga o las alteraciones atencionales pueden por tanto conllevar fallos en la tarea y accidentes laborales. En el caso de la fatiga física, la prevención de dichos estados de fatiga es primordial, a los efectos de regular la cantidad de actividad a realizar en un trabajo, así como la adecuación de pausas de reposo oportunas [5-7]. La fatiga, al igual que otros factores, interfiere la ejecución de la actividad.

2. OBJETO Y ALCANCE

Con dichas premisas, consideramos de interés el comprobar tres fenómenos:

1. En situaciones críticas cuando una reacción rápida es necesaria, saber si hay diferencias en la respuesta motora entre músculos descansados y aquellos sometidos a una contracción mantenida previa.
2. Saber si es relevante el nivel de fatiga previa.
3. Saber si la historia de contracción muscular influye en la ejecución de un programa motor.

Para responder a estas preguntas hemos utilizado el diferenciar gestos hechos en condiciones de reposo respecto a condiciones de 1) fatiga y 2) post-contracción. Dichos tres fenómenos se han exami-

nado analizando cambios en el patrón motor inducidos por actividad muscular previa valorando si tienen algún efecto en los componentes neurales o musculares en el patrón de respuesta balística en una condición de tiempo de reacción.

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Tipo de estudio

Estudio experimental.

Muestra, población diana, criterios de inclusión y exclusión

Dieciséis sujetos voluntarios (9 mujeres y 7 hombres, edad entre 27 y 52 años) tomaron parte en el estudio. Todos eran diestros con visión normal o corregida. Deficiencias sensorio-motoras y enfermedades crónicas fueron criterios de exclusión.

Materiales y/o técnicas utilizadas

Lo sujetos se encontraban de pie delante de una pantalla de ordenador con los brazos colgando cerca del cuerpo. Se registraron señales electromiográficas (EMG) en el brazo derecho mediante electrodos de superficie colocados sobre deltoides anterior (DA) y sobre tríceps braquial (TB). Un acelerómetro se colocó en el epicóndilo humeral para registrar movimientos del brazo y calcular variables cinemáticas.

Variables estudiadas: definición de las mismas

Se ha estudiado el movimiento de abducción de miembro superior, considerando una cadena cinética que incluye hasta la muñeca, con procedimientos de EMG y sensores para medir desplazamiento y fuerza.

Limitaciones y posibles sesgos del estudio

El estudio consideró la posibilidad de interferencias de señal así como falta de aprendizaje o cumplimiento de la actividad por parte de los sujetos. La primera se solventó comprobando la instalación y repitiendo registros. La segunda limitación fue solventada mediante la explicación de la tarea y comprobación de su ejecución antes de comenzar los registros. Los sesgos de registro (off-set) se solventaron compensando los mismos off-line como paso previo a su medición.

Plan de trabajo: cronograma y distribución de actividades en sesiones

Cada sujeto se estudió en una sesión. Se hicieron dos bloques de cada sujeto, de acuerdo con el tipo de contracción que hubiera de realizar tras ensayos control (EC), bien de larga duración (LD) o de corta duración (CD). El orden de pruebas fue aleatorio entre sujetos. El tiempo entre pruebas fue superior a 30 minutos. El experimento comenzó instru-

yendo a los sujetos sobre las condiciones de los ensayos. En los EC, los sujetos fueron solicitados a realizar un movimiento de abducción hasta la horizontal, como respuesta rápida tras la presentación de una señal imperativa (SI) en la pantalla del ordenador. Los ensayos fueron hechos siguiendo paradigmas de tiempos de reacción (TR) sencillos [8,9]. La señal imperativa se generó por el experimentador mediante una señal en el teclado, sin aviso previo.

En cada bloque y tras los EC, los sujetos se colocaron de pie junto a una pared realizar una contracción máxima contra ella, un movimiento abducción con el brazo/la mano derecha, bien durante 30 segundos (LD) como fatiga prolongada o durante 10 segundos (CD) como contracción breve mientras se mantenían en la misma posición. Fueron instruidos para realizar una contracción máxima. Al terminar la contracción los sujetos debieron colocarse frente a la pantalla para realizar los ensayos de TR. Estos se realizaron a intervalos de tiempo específicos tras la contracción de 30 segundos hasta un intervalo de cinco minutos.

Antes del comienzo del estudio los sujetos practicaron un número suficiente de intentos, sin fatiga previa, con retroalimentación de los registros de EMG. Para la situación experimental, los sujetos practicaron el gesto de apoyarse contra la pared, sin empujarla para evitar fatiga innecesaria. El registro de datos comenzó cuando los sujetos se sintieron cómodos con el procedimiento en cada condición. Se registraron 8-10 EC antes de comenzar los ensayos experimentales. Veinte minutos tras finalizar cada bloque de ensayos LD o CD se registraron 8-10 ensayos finales (EF) idénticos al control. El estudio ha seguido los requisitos éticos de la Declaración de Helsinki. Los sujetos fueron informados del estudio así como dieron su consentimiento para participación en el mismo.

Recogida y análisis de datos

Para cada ensayo registramos las señales generadas por la SI, la actividad EMG y el movimiento. Los datos se recogieron en un ordenador personal a una frecuencia de 2000Hz para posterior análisis con software específico. Para registrar la actividad de fondo de EMG se midió la amplitud promedio de la señal rectificadas de EMG tanto de DA como de TB se midieron durante los 200 ms. que precedían a la presentación de la SI.

Para todas las condiciones en las señales registradas tras las SI, medimos las siguientes variables:

1. Comienzo de DA, como latencia de la actividad EMG en DA. En aquellos ensayos en que los músculos podían estar activos durante la SI, se consideró como el momento en que la actividad EMG rectificadas cambiaba más de $10\mu\text{V}/\text{ms}$ en un lapso de 500ms tras la SI.
2. Comienzo de TB, como la latencia de la actividad EMG en el TB. Los criterios de medición fueron como para el DA ya descrito.
3. Comienzo de movimiento (CM). Se mide desde la SI como el momento en que hay un cambio en la señal acelerométrica.

4. Retraso electromecánico (REM). Como la diferencia entre DA y CM.

Pruebas estadísticas utilizadas.

Se utilizaron procedimientos paramétricos. La comparación entre tareas y series se realizó mediante análisis de varianza de medidas repetidas, realizando análisis post-hoc cuando se hallaron diferencias. Las correlaciones entre tareas se calcularon mediante correlación de Pearson. La significancia estadística se estableció para $p < 0.05$.

4. RESULTADOS

Los resultados musculares del estudio del movimiento de abducción de miembro superior incluyen tiempo de pre-movimiento y tiempo de movimiento, mediante procedimientos de cinesiología y principalmente EMG (AD, deltoides anterior, TR: tríceps, MOV: movimiento, y EMD: retraso electromecánico). Ellas reflejan la influencia en el tiempo y evolución de la fatiga por contracción mantenida.

Todos los sujetos realizaron las pruebas adecuadamente. Hay que mencionar que la duración de cada estudio ha sido prolongada al requerir, además de la instrumentación del sujeto, enseñarle a ejecutar todas las partes de la tarea y valorar la recuperación tras el esfuerzo. Pese a ello el estudio ha permitido evaluar la respuesta por contracción mantenida breve y por contracción mantenida prolongada (fatiga).

Las respuestas de deltoides anterior y de tríceps braquial como tiempos de reacción se observan en las Figuras 1 y 2 respectivamente. En ellas se comprueba que existe una reducción de tiempos de reacción en ambos músculos para las dos intervenciones realizadas. Así mismo se comprueba cómo se recuperan los tiempos de reacción y revierten a valores similares a los valores control sobre el minuto cinco. De la misma forma se observa que hay mayor afectación cuando la contracción previa era prolongada. A efectos comparativos, de este análisis descriptivo de datos así como de la subsiguiente inferencia estadística se comprueba la mayor afectación de deltoides anterior respecto a tríceps presentando menores tiempos de respuesta, siendo más evidente tras contracción mantenida, ($p < 0.05$). Los resultados también muestran la mayor prolongación en la duración de la afectación de deltoides anterior respecto a tríceps en ese menor tiempo de respuesta tras contracción mantenida (Figuras 1 y 2), ($p < 0.05$). Las curvas en las Figuras 1 y 2 exponen una similitud en la respuesta entre la condición de post-contracción sencilla y la de fatiga (Figuras 1 y 2), ($p > 0.05$).

El análisis de datos relativos a movimiento ha permitido comprobar que la situación muscular previa también ha afectado al mismo. En la Figura 3 se observa la afectación del movimiento, que se ha comprobado es también significativa ($p < 0.05$) en paralelo a la afectación de deltoides anterior.

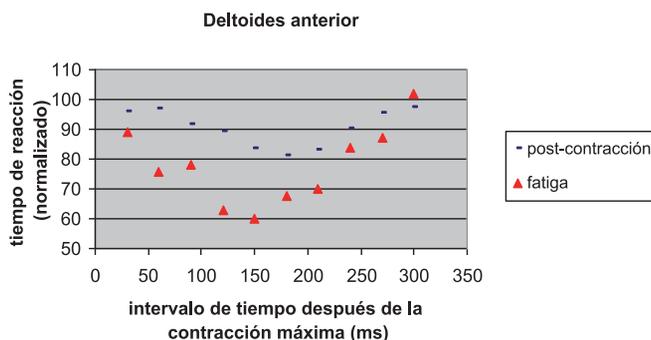


Figura 1. Tiempo de reacción promedio de todos los sujetos para deltoides anterior (en ms) desde 30 segundos hasta 300 segundos tras la contracción. El tiempo de reacción está expresado normalizado tomando como 100% el promedio de valores control. Triángulos rojos: condición de fatiga; rectángulos azules: condición de post-contracción moderada.

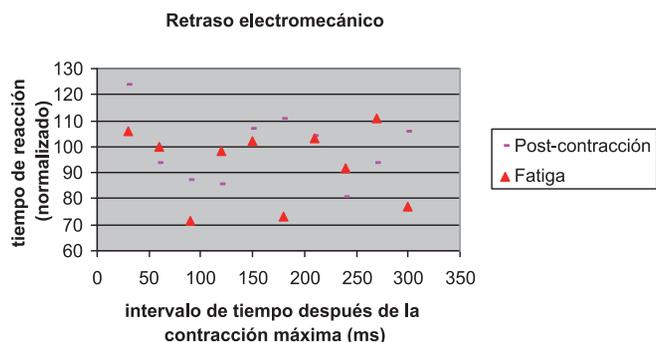


Figura 4. Duración del retraso electromecánico promedio de todos los sujetos (en ms) desde 30 segundos hasta 300 segundos tras la contracción. Normalización respecto a su control y leyenda similar a la Figura 1.

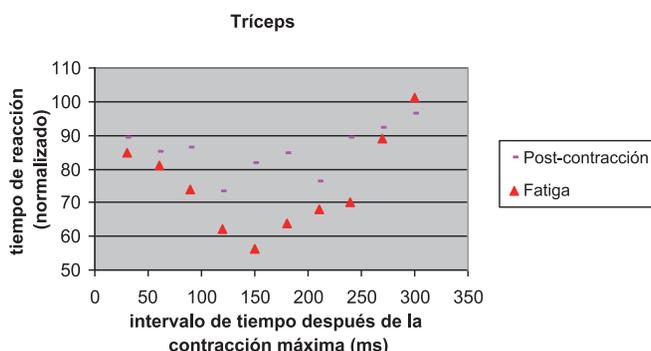


Figura 2. Tiempo de reacción promedio de todos los sujetos para tríceps braquial (en ms) desde 30 segundos hasta 300 segundos tras la contracción. Normalización respecto a su control y leyenda similar a la Figura 1.

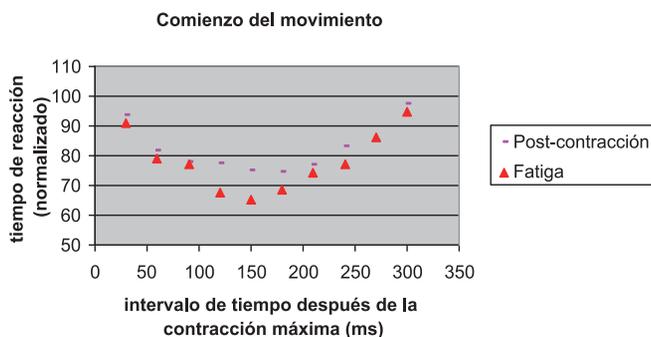


Figura 3. Tiempo de movimiento promedio de todos los sujetos (en ms) desde 30 segundos hasta 300 segundos tras la contracción. Normalización respecto a su control y leyenda similar a la Figura 1.

Dentro del movimiento, se ha comprobado el valor del retraso electromecánico que ha resultado no modificarse por el estado muscular previo Figura 4 careciendo de significancia estadística ($p > 0.05$).

Al participar deltoides anterior y tríceps en una misma cadena de movimiento en la tarea mandada, se ha valorado la correlación de sus tiempos de respuesta. Si bien en la situación control la correlación es alta ($R^2 = 0.8$), tanto en los casos de fatiga como de breve post-contracción se ha visto una menor correlación ($R^2 = 0.4$ y 0.5 respectivamente). La correlación entre deltoides y el subsiguiente movimiento ha sido alta en todas las condiciones (R^2 entre $0.8-0.9$).

5. DISCUSIÓN

El presente estudio ha permitido ver la transición de respuestas musculares en dos umbrales progresivos de actividad muscular previa. La duración de cada estudio ha sido prolongada al requerir, además de la instrumentación del sujeto, enseñarle a ejecutar todas las partes de la tarea y valorar la recuperación tras el esfuerzo. Pese a ello el estudio ha permitido evaluar la respuesta por contracción mantenida breve y por contracción mantenida prolongada (fatiga).

La influencia del estado muscular sobre los tiempos de reacción ya ha sido estudiada bajo diferentes modelos obteniendo resultados variables. Algunos estudios se han centrado en el tiempo premotor [10-12], otros han descrito la ausencia de cambios [13-15], mientras que un tercer grupo ha encontrado reducciones en dichos tiempos [16-20]. Las diferencias pueden haber sido debidas a los diferentes protocolos utilizados. Aquellos que han observado reducciones en los tiempos premotores también han observado respuestas diferentes en el retraso electro-mecánico. Yeung et al. [20] han mostrado un retraso del mismo y lo consideran una compensación para mantener el fin de la tarea. Li et al. [19] usaron imaginaria mental para condicionar la respuesta. Castellote et al. [17] usaron un modelo en el que el músculo se hallaba ya en actividad isométrica o en oscilaciones rápidas. Etnyre y Kinugasa [18] usaron también un modelo de contracción isométrica previa pero de muy breve duración. En todos estos estudios las respuestas han sido medidas justo tras el acondi-

cionamiento, mientras que en nuestro estudio hemos ampliado los tiempos de medición hasta que han vuelto a situaciones basales a los cinco minutos. Este fenómeno, consecuencia de la actividad previa no ha tenido una relación directa con el nivel de la misma, lo que hace pensar que no es tanto el estado basal de partida, sino más la condición y estado tonal muscular los que influyen en la respuesta. Efectos similares se han observado tras estímulos vibratorios, lo que permite considerar que sea un estado funcional aferente mediado por la médula espinal el que condicione la respuesta cortical, voluntaria, de acción motora. El fenómeno se ha observado tanto en musculatura proximal como medial de la extremidad, aunque los efectos son más evidentes en aquella postural (deltoides anterior). Los fenómenos encontrados en movimiento han ido en paralelo, haciendo pensar que son secundarios al efecto premotor, habida cuenta que no ha habido cambios en el retraso electro-mecánico considerado en su conjunto.

Por todo ello consideramos de interés aplicado el prestar atención a las actividades de las personas que realizan trabajos de esfuerzo extenuante, que adoptan posturas incómodas, o realizan movimientos de forma rápida usando los mismos músculos por periodos prolongados de tiempo, ya que una falta en la precisión posterior puede originar resultados fatales en la ocupación o puede ser causa de enfermedades ocupacionales. [21,22] Ciertas tareas en cintas transportadoras, tales como el portar productos de la cinta a cajas, limpieza de fruta, clasificación de vegetales, empaquetado o procesado de comida no sólo requieren movimientos precisos y rápidos sino también una interiorización de la acción a ejecutar ya que la misma ha de realizarse con precisión en las coordenadas espacio-tiempo, requiere capturar y soltar objetos delicados y en ocasiones además una decisión mental sobre la tarea (como es en el caso de seleccionar fruta). El hecho de que los gestos sean repetidos ya reduce el estado óptimo basal muscular ante un evento como una respuesta requerida rápida. Un gesto sigue a otro y aunque el trabajo sea rutinario, existe poco tiempo para perder la atención, requiriendo cierta consciencia de la acción, consciencia que puede ser externamente modificada [23] por parte del sujeto así como se requiere una capacidad de reacción visual ante requerimientos externos [24], capacidad que puede estar limitada en condiciones de fatiga muscular. Ejemplos extremos se observan en la operación de máquinas y conducción de vehículos [25].

6. CONCLUSIONES

A partir de estos resultados sugerimos que el sistema motor del sujeto modula las respuestas rápidas ulteriores. El estudio indica que la estimulación nerviosa usada para ejecutar un movimiento voluntario balístico es afectada por la actividad precedente del sistema motor. Se debe considerar el historial de la actividad motora reciente específicamente en aquellas circunstancias en las que la fatiga

previa local no pueda ser evitada. El sujeto no ha de llegar en su ocupación a estados de fatiga elevados, ya que ha de estar preparado para responder a cualquier alteración interna o externa de tal forma que el individuo pueda estar atento y anticipar adecuadamente un cambio en las condiciones o en la respuesta tanto en precisión como rapidez. En situaciones de riesgo, una equivocación no sólo puede originar un accidente sino que puede tener consecuencias legales.

7. AGRADECIMIENTOS

Los investigadores desean agradecer la colaboración prestada por los voluntarios participantes así como las facilidades concedidas por FUNDACIÓN MAPFRE durante el desarrollo de la investigación para su correcta consecución.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Downs DG. Nonspecific work-related upper extremity disorders. *Am Fam Physician* 1997; 55: 1296-302.
- Muggleton JM, Allen R, Chappell PH. Hand and arm injuries associated with repetitive manual work in industry: a review of disorders, risk factors and preventive measures. *Ergonomics* 1999; 42: 714-39.
- Ranney D. Work-related chronic injuries of the forearm and hand: their specific diagnosis and management. *Ergonomics* 1993; 36: 871-80.
- Sorgatz H. Repetitive strain injuries. Forearm pain caused by tissue responses to repetitive strain. *Orthopade* 2002; 10: 1006-14.
- Bosch T, de Looze MP, Kingma I, Visser B, van Dieën JH. Electromyographical manifestations of muscle fatigue during different levels of simulated light manual assembly work. *Electromyogr Kinesiol* 2009; 19: 246-56.
- de Looze M, Bosch T, van Dieën J. Manifestations of shoulder fatigue in prolonged activities involving low-force contractions. *Ergonomics* 2009; 52: 428-37.
- Miller RG, Moussavi RS, Green AT, Carson PJ, Weiner MW. The fatigue of rapid repetitive movements. *Neurology* 1993; 43: 755-61.
- Berardelli A, Hallett M, Rothwell JC, Agostino R, Manfredi M, Thompson PD, Marsden CD. Single-joint rapid arm movements in normal subjects and in patients with motor disorders. *Brain* 1996; 119: 661-74.
- Hallett M, Shahani BT, Young RR. EMG analysis of stereotyped voluntary movements in man. *J Neurol Neurosurg Psychiatry* 1975; 38: 1154-62.
- Benesch S, Putz W, Rosenbaum D, Becker HP. Reliability of peroneal reaction time measurements. *Clinical Biomechanics* 2000; 15: 21-8.
- Hanson C, Lofthus GK. Effects of Fatigue and Laterality on Fractionated Reaction-Time. *Journal of Motor Behavior* 1978; 10: 177-84.
- Wojtys EM, Wylie BB, Huston LJ. The Effects of Muscle Fatigue on Neuromuscular Function and Anterior Tibial Translation in Healthy Knees. *The American Journal of Sports Medicine* 1996; 24: 615-21.

13. Moore BD, Drouin J, Gransneder BM, Shultz SJ. The differential effects of fatigue on reflex response timing and amplitude in males and females. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 2002; 12: 351-60.
14. Paasuke M, Ereline J, Gapeyeva H. Neuromuscular fatigue during repeated exhaustive submaximal static contractions of knee extensor muscles in endurance-trained, power-trained and untrained men. *Acta Physiologica Scandinavica* 1999; 166: 319-26.
15. van Duinen H, Renken R, Maurits N, Zijdwind I. Effects of motor fatigue on human brain activity, an fMRI study. *Neuroimage* 2007; 35: 1438-49.
16. Axelson HW. Signs of muscle thixotropy during human ballistic wrist joint movements. *J Appl Physiol* 2005; 99: 1922-9.
17. Castellote JM, Valls-Sole J, Sanegre MT. Ballistic reactions under different motor sets. *Experimental Brain Research* 2004; 158: 35-42.
18. Etnyre B, Kinugasa T. Postcontraction influences on reaction time. *Research Quarterly for Exercise and Sport* 2002; 73: 271-81.
19. Li S, Stevens JA, Kamper DG, Rymer WZ. The movement-specific effect of motor imagery on the premotor time. *Motor Control* 2005; 9: 119-28.
20. Yeung SS, Au AL, Chow CC. Effects of fatigue on the temporal neuromuscular control of vastus medialis muscle in humans. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 1999; 80: 379-85.
21. Eiert JE, Rantapää-Dahlqvist SB, Henriksson-Larsén K, Lorentzon R, Gerdlé BU. Muscle performance, electromyography and fibre type composition in fibromyalgia and work-related myalgia. *Scand J Rheumatol* 1992; 21: 28-34.
22. Guerra FG. Evolution of work duties in manufacturing activities. *Ital Med Lav Ergon* 2001; 23: 160-71.
23. Sanegre MT, Castellote JM, Haggard P, Valls-Sole J. The effects of a startle on awareness of action. *J. Exp Brain Res* 2004; 155: 527-31.
24. Castellote JM, Kumru H, Queralt A, Valls-Sole J. A startle speeds up the execution of externally guided saccades. *J Exp Brain Res* 2007; 177: 129-36.
25. Chang HL, Ju LS. Effect of consecutive driving on accident risk: a comparison between passenger and freight train driving. *Accid Anal Prev* 2008; 40: 1844-9.

Conflicto de intereses

Los autores hemos recibido ayuda económica de FUNDACIÓN MAPFRE para la realización de este proyecto. No hemos firmado ningún acuerdo por el que vayamos a recibir beneficios u honorarios por parte de alguna entidad comercial o de FUNDACIÓN MAPFRE.