

ANÁLISIS BIOMECÁNICO DE ESPALDA Y BRAZOS PARA EL DESARROLLO DE HERRAMIENTAS PORTÁTILES

BIOMECHANICAL ANALYSIS OF ARMS AND BACK FOR THE DEVELOPMENT OF PORTABLE TOOLS

Hugo Andrés López Fisco¹; Juan Rodrigo Sanz Uribe²; Fernando Álvarez Mejía³

Resumen. Cuando se realizan labores agrícolas semimecanizadas como fertilización, fumigación, cosecha y otras, los operarios regularmente llevan una carga en su espalda y una herramienta en una de sus manos. En este trabajo se estimaron los esfuerzos que se generan en las articulaciones del hombro y del disco intervertebral L5-S1, para una persona promedio realizando labores agrícolas con herramientas portátiles de este tipo. Para hacer el análisis se desarrolló una herramienta computacional denominada HOMO, en la cual se consideran las posiciones más comunes del brazo e inclinaciones más comunes del eje de la columna vertebral cuando se usan equipos de espalda. El análisis determinó que una carga en la espalda de 12 kg combinada con un elemento de 0,5 kg en la mano, no son perjudiciales para la salud de los trabajadores agrícolas.

Palabras claves: Biomecánica, diseño de herramientas portátiles, labores agrícolas.

Abstract. In semi-mechanized agricultural labors such as fertilization, pesticide application, harvesting and others, operators usually carry loads in backpacks and a tool in one of their hands. This work estimated the stresses that result in the shoulder and in the inter-vertebral disk L5-S1 of an average operator performing agricultural labors with back-mounted equipment. In order to perform the analysis it was developed a computational tool called HOMO, which considers the most common positions of the arm and the most common inclinations of the backbone when using back-mounted equipment. This analysis determined that a 12 kg load on the operator's back, combined with a 0,5 kg tool in the operator's hand, are not harmful for the studied joints.

Key words: Biomechanics, design of portable tools, agricultural labors.

Las herramientas de espalda son ampliamente usadas para realizar labores agrícolas tales como fertilización, aspersión de insecticidas químicos y biológicos, aspersión de agentes químicos y biológicos para el control de enfermedades, y cosecha. Estas herramientas también son frecuentemente usadas en otras labores como limpieza con equipos sopladores y aspiradores.

En este estudio se determinaron las cargas máximas que pueden ser llevadas simultáneamente en la espalda y una de las manos de los trabajadores agrícolas, sin que haya lesiones músculo-esqueléticas en las dos articulaciones más comprometidas: El hombro (Escápulo-Humeral) y la espalda baja (lumbosacral). Se escogió esa simultaneidad porque ella regularmente se da cuando se realizan las labores agrícolas mencionadas.

En este estudio se utilizó solamente el análisis estático de cargas (primera ley de Newton), dado que las cargas dinámicas se consideraron despreciables dada la lentitud de los movimientos cuando se utilizan herramientas portátiles.

Para hacer el análisis mencionado se creó una herramienta computacional en MatLab[®] denominada HOMO, la cual puede ser de utilidad para análisis similares o condiciones particulares de diferentes herramientas agrícolas, para condiciones particulares de operarios, o también para programas de salud ocupacional en el campo.

METODOLOGÍA

Análisis biomecánico de brazo. En el análisis biomecánico de carga estática para los brazos, se estimaron los esfuerzos que se generan en la articulación del hombro (Escápulo-Humeral), Figuras 1 y 2, para un trabajador agrícola promedio

¹ Investigador. Centro Nacional de Investigaciones de Café-CENICAFE, Sede Planalto, km. 4 vía Chinchiná, Caldas, Colombia. <Hugo.lopez@cafede colombia.com>

² Investigador Científico II. Centro Nacional de Investigaciones de Café-CENICAFE, Sede Planalto, km. 4 vía Chinchiná, Caldas, Colombia. <Juanr.sanz@cafede colombia.com>

³ Profesor Titular. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A. 1779, Medellín, Colombia. <falvarez@unalmed.edu.co>

adoptando posturas comunes durante sus labores, con una carga adicional sostenida en una de sus manos (Impulse Training Systems, 2003).

De acuerdo con Philips (2000), en el sistema biomecánico del hombro actúan la fuerza debida al peso del brazo, que equivale, aproximadamente al 5% del peso corporal ubicado en el centro geométrico de la postura del brazo y la fuerza que

ejerce el músculo deltoides (Figura 1), al contrarrestar los movimientos de abducción del brazo al articular el hombro en las diferentes direcciones. La acción del músculo deltoides depende de la inclinación de los ejes del brazo y antebrazo además de las fuerzas involucradas en el sistema.

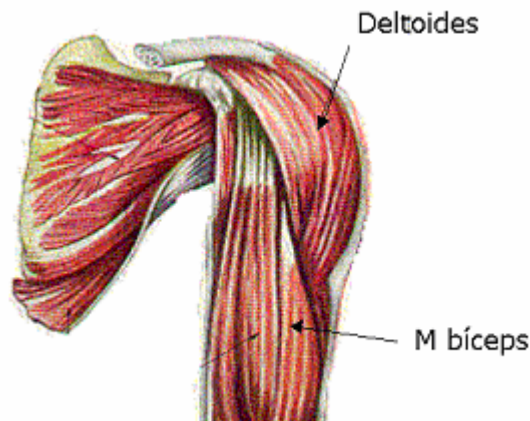


Figura 1. Músculo deltoides. Fuente: MED LINE.

Para el sistema biomecánico planteado se analizó el equilibrio estático del brazo para los movimientos típicos permitidos por la articulación Escápulo-Humeral (extensión frontal y abducción horizontal del hombro) y por la articulación del codo (flexión y extensión) estudiado por Putz y Pabst (1994). Para este fin se determinaron las reacciones R_x y R_y en la articulación Escápulo-Humeral y la variación de la tensión F_m que se genera en el músculo deltoides como resultado del desplazamiento general del brazo. En la Figura 2 se observan los cuadrantes de trabajo considerados como críticos para el análisis realizado.

Este análisis cubrió gran cantidad de combinaciones de extensiones del hombro y codo, empleando un

programa de computador que tiene como variables de entrada la estatura (H) y masa (m) del individuo, en metros y kg respectivamente, y la masa del elemento cargado en la mano, también en kg. El programa determina las reacciones en la articulación cuando se aplica la primera ley de Newton al brazo como muestra la Figura 3.

Análisis biomecánico de la espalda. El análisis biomecánico de carga estática estimó también los esfuerzos que se generan en la columna vertebral cuando se tiene una carga en ella. El rango de inclinación utilizado fue entre -75° y 75° con respecto a la vertical, para poder establecer si se presentan lesiones músculo-esqueléticas.

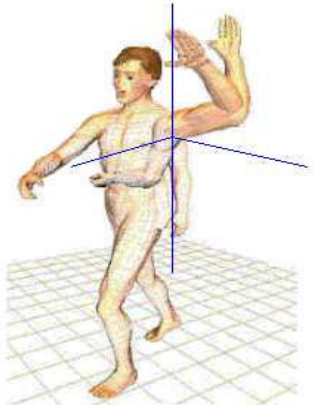


Figura 2 Cuadrantes de desplazamiento crítico en la recolección de café. Fuente: MED LINE.

Según Philips (2000), en el sistema biomecánico de la espalda actúan tres fuerzas propias del cuerpo humano así (Figura 5): 1) al nivel de la vértebra T2 (segunda vértebra torácica), se ubica la fuerza debida al peso de los brazos y la cabeza que equivale, aproximadamente, al 18% del peso corporal. 2) Al nivel de la T11 (decimaprimera vértebra torácica), se ubica la fuerza propia del peso del tronco, que equivale, aproximadamente, al 36% del peso corporal, y 3) en la T7 (séptima vértebra torácica), se ubica bien sea la fuerza del músculo recto abdominal (para posturas en el segundo cuadrante cartesiano), o del músculo erector de la columna (para posturas en el primer y cuarto cuadrante). Las fuerzas debidas a la acción de estos músculos dependen de la inclinación del eje de la columna y de las fuerzas involucradas en el sistema.

Para el caso particular de la recolección manual asistida con el equipo Aroandes¹, se ubicó una cuarta fuerza de 120 N en el centro de masa del recipiente de almacenamiento a máxima capacidad, se evaluó mediante un análisis biomecánico de carga

¹ Aroandes®: Herramienta desarrollada por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia para asistir la cosecha manual de café, la cual consta de una manga que conduce a un recipiente en la espalda del operario y que en la boca tiene un aro flexible que se sujeta al antebrazo y que a su vez sirve como receptáculo de los frutos que son desprendidos manualmente.

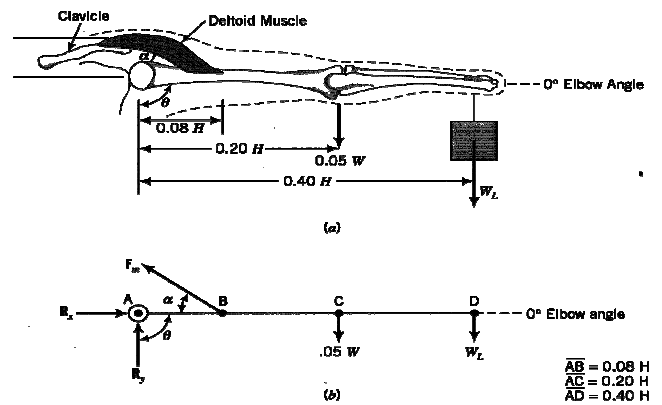


Figura 3. Diagrama de cuerpo libre del sistema brazo antebrazo. Fuente: Phillips (2000). (Español).

estática para un rango de inclinación de la misma con respecto a un eje horizontal de 150° , dentro del cual se consideran las posturas típicas de los recolectores (en cunclillas, de pié e intermedias), donde el eje de la columna vertebral soporta el recipiente plástico de espalda con su capacidad total.

Para el anterior sistema biomecánico se procedió a estimar los componentes de las fuerzas de corte y de compresión en el disco L5-S1 (lumbosacral), para lo cual fue necesario calcular los componentes de las fuerzas resultantes tanto en las abscisas como en las ordenadas (R_x y R_y).

Se estimó, a través de mediciones goniométricas que el ángulo formado entre la horizontal y el eje de la columna oscila desde los -10° hasta 100° , es decir, que el tronco se ubica en el primero, segundo y cuarto cuadrante cartesiano.

Las variaciones de postura para los desplazamientos en el segundo cuadrante son equilibradas por el músculo recto abdominal, el cual se origina en los cartílagos de la quinta y séptima costillas y la apófisis xifoides del ligamento costoxifoides y se inserta en el borde craneal del pubis entre el tubérculo y la sínfisis del pubis, tal como lo muestra la Figura 4 (Vélez, 2000), el ángulo que toma este músculo respecto a la vertical fue estimado mediante

procedimientos geométricos tomando un valor aproximado de 12° .

Los músculos implicados en el sistema estático para la gran mayoría de las posturas del primero y cuarto cuadrante, corresponden al erector de la columna (Figura 4B) (Vélez, 2000), que está compuesto por los músculos iliocostal lumbar y longísimo del tórax, ambos se originan entre la cara dorsal del sacro, las apófisis espinosas de las vértebras lumbares y los labios laterales de las crestas ilíacas. El primero se

inserta en los ángulos de la quinta y decimasegunda costilla y el segundo se inserta en las apófisis accesorias de las vértebras lumbares superiores, en la apófisis transversal de las vértebras torácicas y en los vértices de las apófisis ostiformes de las vértebras lumbares superiores y todas las costillas, entre los ángulos y la tuberosidad (Vélez, 2000). Phillips (2000) precisa que el ángulo formado entre este músculo y el eje de la columna puede asumirse como de 13° .

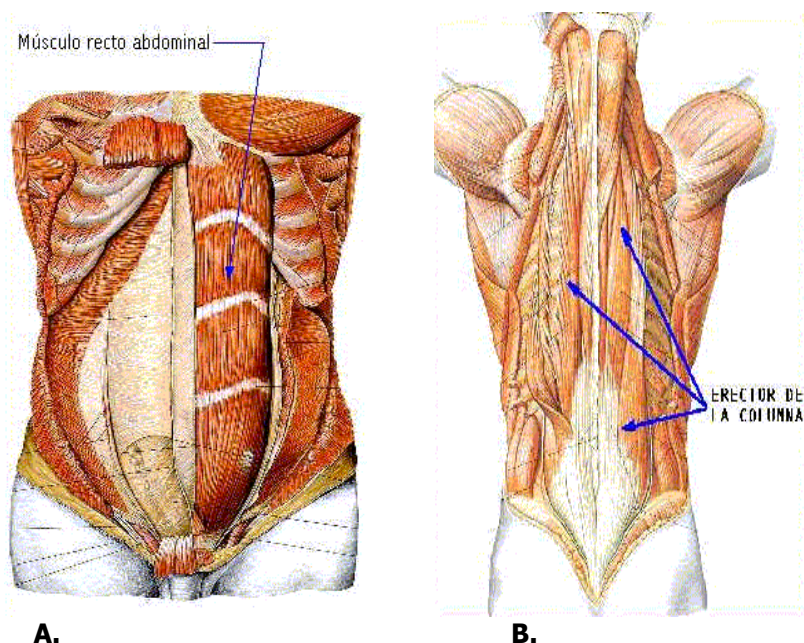


Figura 4. Músculos que actúan en el equilibrio estático del sistema biomecánico de espalda con respecto a la vértebra L5S1. A. Músculo recto abdominal. B. Músculo erector de la columna.

El análisis de carga estática se desarrolló empleando un algoritmo que tiene como variables de entrada la estatura (H) y masa (m) del individuo, en metros y kg respectivamente, y la masa del elemento cargado en la espalda, también en kg. El programa Homo determina las fuerzas que se generan en la L5S1

cuando se aplica la primera ley de Newton a la columna vertebral, incluyendo las fuerzas debidas a su propio peso, más la fuerza debida a la carga (Instituto Químico Biológico, 2003) (Figura 5).

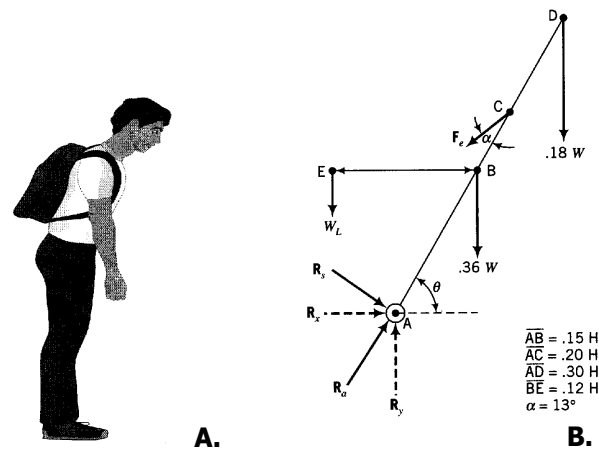


Figura 5. Diagrama de cuerpo libre sobre el cual se realizó el análisis estático para una carga soportada en la espalda de 12 kg. A. Persona cargando un peso en la espalda. B. Diagrama de cuerpo libre de una persona cargando un peso en la espalda. Fuente: Phillips (2000).

Para los análisis biomecánicos, las fuerzas cortante y de compresión fueron calculadas con los registros antropométricos anteriores, los intervalos de confianza para el promedio de la fuerza de compresión y de corte.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Los resultados obtenidos empleando el algoritmo se pueden observar en las gráficas de las Figuras 6, 7 y 8.

El comportamiento de la fuerza de tensión a que está sometido el músculo deltoides para contrarrestar la flexión-extensión del hombro se ve afectada por la flexión extensión del codo, se

observa además que para una variación de la flexión del antebrazo (articulación del codo) con respecto al brazo en un rango de 50 a 110° y una flexión del hombro con respecto al eje vertical de -90 a -80° la tensión generada en el músculo deltoides, tiene una magnitud por lo menos de 280 N y que disminuye progresivamente tanto a medida que se flexiona el codo y se contrae el hombro. Los valores negativos indican que para algunas posiciones de las articulaciones superiores a 40° en el codo con respecto al brazo y arriba de 25° para el hombro la reacción en el músculo deltoides no genera tensión, solamente un valor neutro o posiblemente compresión.

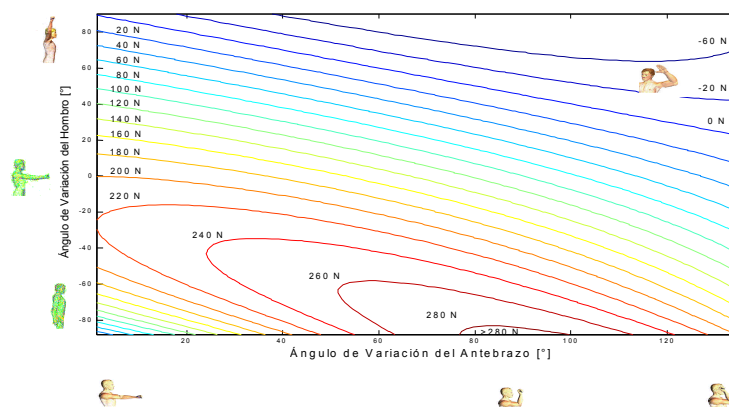


Figura 6. Fuerza de tensión F_m originada en la combinación de los posibles ángulos de desplazamiento para el brazo y el antebrazo. Fuente: Resultado del análisis estático.

La reacción de R_x a la que esta expuesta la articulación Escápulo-Humeral se analizo de una manera similar a la anterior encontrando la siguiente combinación de ángulos y áreas de respuesta en Newton (Figura 7).

Se aprecia claramente que la reacción R_x toma una máxima magnitud de 240 N para la combinación de los siguientes ángulos del hombro y del codo

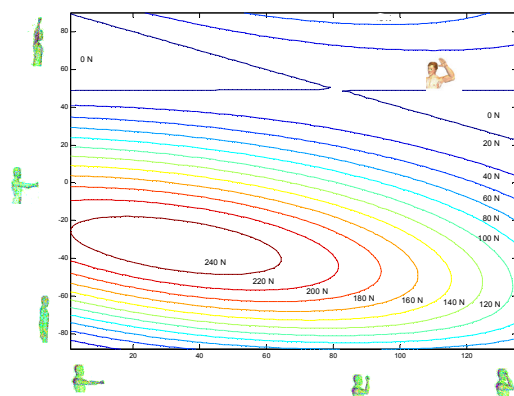


Figura 7. Reacción R_x ante la combinación de los posibles ángulos de desplazamiento para el brazo y el antebrazo.

respectivamente con respecto al eje vertical y al brazo de -45 a -22° y desde 0 hasta 65° , se observa además, que esta magnitud disminuyen gradualmente hasta llegar a valores negativos que pueden ser explicados al imaginar la posición en la cual se encuentra orientado el brazo con el codo totalmente flexionado por encima de 100° y con el hombro contraído por encima de los 60° con respecto a la horizontal.

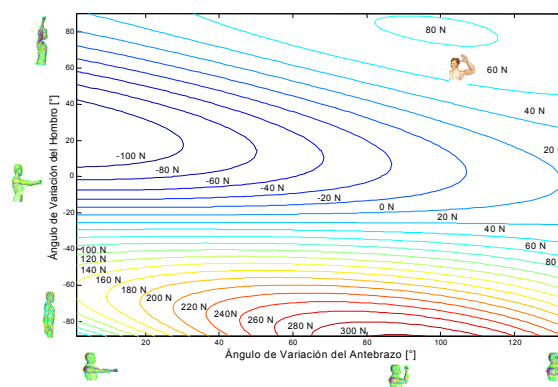


Figura 8. Reacción R_x ante la combinación de los posibles ángulos de desplazamiento para el brazo y el antebrazo.

La reacción de R_y a la que está expuesta la articulación Escápulo-Humeral se analizó de una manera similar a la anterior encontrando la siguiente combinación de ángulos y reacciones en Newtons.

La reacción R_y presenta una magnitud mayor que oscila desde una fuerza negativa de 100 N hasta una de 320 N la mayor fuerza que soporta la articulación del hombro en el sentido vertical se presenta cuando el operario realiza los movimientos comprendidos entre los siguientes ángulos para el brazo y para el

antebrazo respectivamente: desde -90 hasta -85° y con una flexión del codo de 80 a 100° con respecto al eje del brazo; a partir de un ángulo de -20° con respecto a la horizontal y para casi todas las posibles flexiones del codo los valores de la fuerza de reacción R_y presentan un sentido contrario y una magnitud que para las condiciones extremas apreciadas en la Figura 9 no supera los 100 N.

Los resultados del análisis biomecánico indican las siguientes magnitudes:

Tabla 1. en L5S1 para las componentes x e y , para el análisis biomecánico.

Reacción [N]	Máxima	Promedio	Mínima
R_x	1901,80	1009,68	-117,55
R_y	958,24	660,15	-362,05
R_a (Axial)	1900,60	1217,68	-534,75
R_c (Cortante)	1412,60	980,41	-548,22

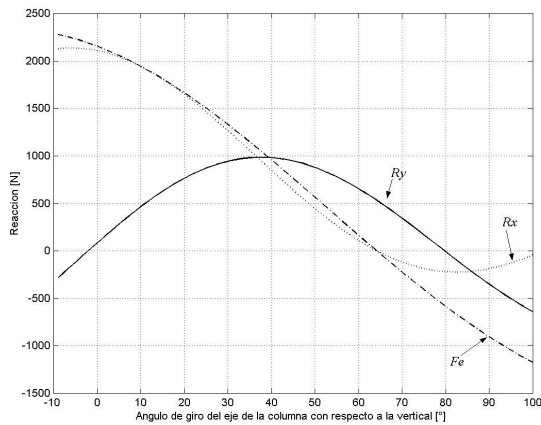


Figura 9. Reacciones R_x , R_y y F_e obtenidas del análisis biomecánico de carga soportada en la espalda, con respecto a L5S1 para una persona cargando una masa de 12 kg.

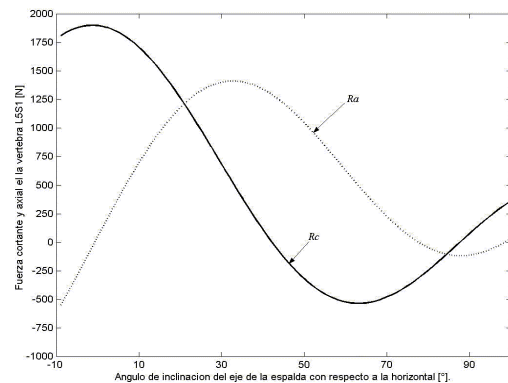


Figura 10. Esfuerzo cortante R_c y fuerza axial R_a obtenidas del análisis biomecánico de carga soportada en la espalda, con respecto a L5S1 para una persona cargando un peso de 12 kg.

Para todas las posturas analizadas, se tiene que las fuerzas de compresión en el disco L5S1 son inferiores al límite de acción permisible para trabajos pesados (3.400N), según la norma NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health, USA.), lo cual muestra que bajo lo anteriormente planteado, no existe la posibilidad de que los recolectores sufran fracturas en las vértebras lumbares debido al peso del recipiente plástico. En cuanto a las fuerzas de corte se puede decir que los valores incluidos en el intervalo de confianza asociado al promedio muestra que por efecto del dispositivo de espalda para almacenamiento de café cereza, no es posible que los recolectores generen hernias discales.

El anterior análisis indica que el actual sistema de asistencia al recolector a través del equipo Aroandes, no induce lesiones permanentes por cargas estáticas en la columna vertebral, sin embargo se recomienda tener en cuenta una pequeña flexión en rodillas, ya que al estar por periodos prolongados de pie y con la rodilla extendida se genera una carga a nivel lumbar; Igualmente se recomienda determinar inicialmente que las personas que van a portar las herramientas no deben presentar problemas de columna o lesiones a nivel de espalda para manipular el equipo y finalmente se recomienda realizar ejercicios de estiramiento enfocado sobre

todo a los músculos más involucrados (espalda y hombro).

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al personal científico de la disciplina de Ingeniería Agrícola de CENICAFE y a la Profesional en Salud Ocupacional Paula Marcela García por todos sus aportes.

BIBLIOGRAFÍA

Impulse Training Systems. Impulse Exercise Setup. En: [http://www. Impulsepower .com/ default .htm](http://www.Impulsepower.com/default.htm); consulta: diciembre 2003.

Instituto Químico Biológico. Anatomía humana España. En: [http:// www. iqb.es/ CBasicas/ Anatomia/Toc05.htm](http://www.iqb.es/CBasicas/Anatomia/Toc05.htm); consulta: diciembre 2003.

Med Line, Biblioteca Nacional de Medicina de EE.UU. Inflamación de la articulación del hombro. En: <http://www.nlm.nih.gov>; consulta: diciembre 2003.

Phillips, Ch. A. 2000. Human factors engineering, John Wiley & Sons, United States of America. 654 p.

Putz, R., R. Pabst. 1994. Atlas de anatomía humana. Tomo II. Editorial Médica Panamericana S.A., Madrid. 399 p.

Vélez, Z.J.C. 2000. Informe anual de actividades. CENICAFÉ. Chinchiná, Colombia.