

Monograph

Efectos del Equipamiento y del Protocolo de Ejercicios sobre el Estímulo para la Reconstrucción y Formación de Hueso

Kathie E Mcalpine y James A Tindall

GES Dept., University of Colorado, Denver, Denver, CO 80217, Estados Unidos.

RESUMEN

La pérdida ósea se ha transformado en un factor limitante para los viajes espaciales tripulados de larga duración y afecta, en forma de osteoporosis, a millones de personas en todo mundo. Ambas condiciones continúan siendo los principales desafíos médicos. Fueron comparados protocolos que implican ejercicios con movimientos acelerados en un equipo con barras de resistencia con estándares de pesos libres utilizando los regímenes de ejercicio empleados en la Estación Espacial Internacional. A las parejas de sujetos se les realizaron mediciones de marcadores bioquímicos y densitometría ósea (DEXA), antes y después de los ejercicios (pre- y post-ejercicio). Para obtener información respecto a la formación ósea y disminución de la actividad de resorción ósea, se empleó una combinación de estudios bioquímicos y radiológicos. Después de un régimen de 17 semanas de ejercicios acelerados, el grupo que utilizó las barras de resistencia, presentó un aumento significativo ($p < 0,05$) de 3,5%, en la densidad ósea de la columna lumbar, con respecto al aumento de 0,9% ($p < 0,05$), que se observó en el grupo que utilizó pesos libres. La densidad ósea de la cadera y los resultados de marcadores bioquímicos óseos fueron comparables entre el grupo con pesos libres y el grupo con barras de resistencia, con cadencia variable. Lo más notable, fue la similitud observada entre los grupos (H_0 , $p = 0,937$) en el cambio en la osteocalcina (un indicador de producción activa de hueso) que se observó pre- y post-estudio. El valor medio de osteocalcina, presentó aumentos significativos ($p = 0,016$) pre- vs. post-estudio, cuando se combinaron todos los sujetos. Ambos grupos presentaron un cambio no significativo, de aproximadamente 2% en el valor medio de la densidad ósea de la parte izquierda de la cadera. Estos resultados indican que el uso de un dispositivo con barras de resistencia, junto con un protocolo de ejercicios mejorado puede ser beneficioso para prevenir la pérdida ósea.

Palabras Clave: viaje espacial, resorción ósea, reconstrucción ósea, masa ósea, fortalecimiento óseo, ejercicios acelerados

INTRODUCCION

La pérdida ósea provocada por la ausencia de gravedad y su equivalente terrestre, la osteoporosis, siguen siendo, a pesar de los adelantos en la tecnología y en la medicina, los principales desafíos médicos. Desde que se lanzó el Sputnik 1 en 1957, la conquista del espacio ha atormentado las mentes de algunos de los mejores científicos de la Tierra. Si bien se han superado muchas barreras técnicas para lograr los vuelos espaciales, la pérdida ósea provocada por la ausencia de gravedad sigue siendo uno de los obstáculos fisiológicos más importantes para sobrevivir en los viajes espaciales tripulados de larga duración. Los astronautas en el espacio, tienen una pérdida ósea (masa) de 2% en promedio por mes, e

incluso, un cosmonauta experimentó una disminución en la densidad ósea del 20% (1-3).

En la Tierra, la osteoporosis afecta a millones de personas (4), produciendo a menudo invalidez a largo plazo y a veces la muerte. El ejercicio ha sido una de las principales medidas de prevención, empleada para intentar disminuir la pérdida ósea y atrofia muscular, asociadas con los viajes espaciales. Se sabe que el ejercicio es útil para mejorar la aptitud cardiovascular, respiratoria y psicológica, en el espacio y en la tierra (5, 6). Sin embargo, a pesar de los continuos esfuerzos, el equipamiento y los protocolos de ejercicio utilizados en la actualidad no logran disminuir adecuadamente la pérdida ósea en el espacio. Esto se evidencia por datos provenientes de investigaciones que indican que durante un viaje espacial, se produce una pérdida de masa ósea de aproximadamente 2% por mes (3). El principal objetivo de este estudio fue comparar un nuevo protocolo de ejercicios realizado con un dispositivo con barras de resistencia y un programa de rutinas de ejercicios ofrecidos en la Estación Espacial Internacional realizado con pesos libres. Este estudio piloto fue realizado como un paso para encontrar protocolos efectivos, junto con equipamiento seguro, confiable y económico, frente a las máquinas complejas usadas en los transbordadores espaciales y en la Estación Espacial Internacional. Las bandas elásticas utilizadas en la actualidad como respaldo contra las fallas de las máquinas principales, parecen ser soluciones inadecuadas para combatir la pérdida ósea, tal como se observa a través del constante problema de "pérdida ósea" que sufren los astronautas durante los viajes espaciales (1, 3).

Se observaron aumentos en la densidad mineral ósea (BMD) luego de la realización de ejercicios con traslado de peso de alto impacto, que involucraban trote, saltos y caminatas (7). En un trabajo que estudió los efectos de los ejercicios de alto impacto en mujeres premenopáusicas, se observaron incrementos de aproximadamente 1,1% en la BMD del cuello femoral, pero no se observaron efectos en la BMD lumbar total, excepto en la región L1. (7). En un meta-análisis que involucraba 225 sujetos de 8 estudios donde se analizaron los efectos del ejercicio sobre la BMD en varones, se observaron cambios estadísticamente significativos en la BMD del fémur, columna lumbar y en la parte posterior del talón (calcáneo). Se observaron incrementos de 2,1% en la BMD de los deportistas cuando los sitios analizados correspondían a los sitios que habían realizado el ejercicio (8).

En un estudio que realizó una comparación de los efectos de entrenamiento de la fuerza (ST) vs. entrenamiento de la potencia (PT), en cincuenta y tres mujeres post-menopáusicas, el grupo de PT mantuvo su BMD tanto en la columna (+0,7±2,1%, no significativa), como en la cadera completa (0,0±1,7%, diferencias no significativas), mientras que en el grupo que realizó ST se observó una pérdida significativa de BMD en ambos sitios (columna: -0,9 ± 1,9%; p <0,05; cadera completa: -1,2 ± 1,5%; p <0,01), (9).

Maddalozzo y Nieve (10) observaron que programa de ejercicios de pesos libres de alta intensidad realizados de pie producía un aumento de 1,9% (p<0,05) en la BMD de la columna en los varones, pero no en las mujeres estudiadas. Ni hombres ni mujeres mostraron un cambio significativo en la BMD de la columna luego que de un programa de entrenamiento de sobrecarga de intensidad moderada que se realizó, mientras los sujetos permanecían sentados. Los resultados de los estudios anteriores proporcionan algunas indicaciones sobre la probable necesidad de enfocarse hacia sitios específicos y con una fuerza considerable para mejorar la respuesta ósea.

El ejercicio puede ser la opción de prevención más viable para los astronautas y es, quizás, el método indicado para evitar que los individuos generalmente saludables, se enfrenten con los efectos colaterales y riesgos de consumir medicamentos a largo plazo, que es otro de los posibles remedios. Hay muchos beneficios adicionales de utilizar el ejercicio como medida de prevención contra la pérdida ósea, entre, éstos se incluyen mejoras y mantenimiento de la salud cardiovascular, respiratoria y psicológica (5, 6, 11).

Aumentar al máximo y centralizar el efecto del ejercicio sobre la densidad ósea es una tarea formidable. Generalmente, el uso de pesos libres en ejercicios y en estudios con protocolos de ejercicio, se considera el método de referencia para proporcionar cargas mecánicas (6). Sin embargo, la utilización de máquinas y aparatos con barras de resistencia puede proporcionar una aplicación más amplia, por ejemplo para personas de edad avanzada o en condiciones de microgravedad.

Inicialmente este estudio fue realizado para valorar el potencial de formación de hueso de la combinación de un régimen de entrenamiento con movimientos acelerados utilizando un equipo con barras de resistencia en comparación con el uso de un programa de ejercicios empleando pesos libres. Un objetivo adicional de este proyecto fue ayudar a encontrar el equipo de respaldo adecuado para el Dispositivo de Resistencia Interino (iRED) empleado en la Estación Espacial Internacional (ISS), así como también estudiar las posibles técnicas de tratamiento y prevención de la osteoporosis asociada al envejecimiento en la tierra. La Fundación Nacional de Osteoporosis estima que aproximadamente 44 millones de americanos, o 55% de las personas que tienen 50 o más años de edad, padecen osteoporosis o poseen un importante riesgo de desarrollar esta enfermedad (4).

Los resultados de este estudio piloto podrían usarse en la decisión de realizar investigaciones posteriores en estudios costosos de microgravedad simulada o directa, utilizando éste protocolo y equipamiento.

Debido al que este estudio se realizó en un ambiente “terrestre”, la importancia de estos resultados puede tener mayores aplicaciones para la población general.

MÉTODOS

Sujetos

Los sujetos de la prueba fueron agrupados en dos grupos principales (peso libre versus barras compuestas) teniendo en cuenta género, edad, talla, peso, experiencia en ejercicios y nivel de aptitud física. Todos los sujetos eran caucásicos. La edad media de los sujetos era 46 años (edades entre 32 y 54 años). Inicialmente participaron 6 varones y 6 mujeres quienes fueron asignados a los grupos de estudio. La altura media de los varones fue 1,82 m (entre 1,74 y 1,90 m) y el peso medio era de 85,5 kg (entre 67 y 100 kg). Las mujeres tenían una altura media de 1,60 m (entre 1,53 y 1,68 m) con un peso promedio de 63,5 kg (entre 51 y 86 kg). En el Protocolo 1 del grupo de comparación (grupo control) se usaron pesos libres como carga mecánica.

El objetivo del estudio fue evaluar la efectividad del Protocolo 2 vs. la del Protocolo 1.

Para evaluar el funcionamiento del equipo se recurrió a un individuo externo. Esta persona coincidía con las características de género, edad, talla peso y nivel de rendimiento, previos de los sujetos agrupados en los Protocolos 1 y 2. Este sujeto utilizó un aparato con barras de resistencia compuestas mientras realizaba los ejercicios con peso libre estándar sin cambios de adaptación de cadencia. Este individuo participó para aportar información subjetiva acerca del funcionamiento del equipo. Por ejemplo, complejidad del uso de las barras de resistencia compuestas, comodidad del equipo, informar cualquier funcionamiento defectuoso del equipo e incluso observar cuales reparaciones eran necesarias. Este sujeto fue evaluado separadamente de los dos grupos de estudio.

Procedimientos

Este estudio fue realizado durante un período de 19-semanas, en las instalaciones de *Point Athletic Club* en *Lakewood*, Colorado en cooperación con la Universidad de Denver. Todos los protocolos y procedimientos fueron aprobados por el Comité de Revisión Institucional en la Universidad de Denver.

Todos los sujetos revisaron y firmaron un consentimiento informado antes de participar en el estudio. La confidencialidad de los sujetos se mantuvo siguiendo las pautas de HIPAA.

Se realizó una comparación entre los protocolos de ejercicio que involucraban movimientos acelerados en un sistema de barras de resistencia, con un régimen de ejercicios de rutina con pesos libres similar a los que se emplean en la Estación Espacial Internacional. Los sujetos fueron asignados a uno de los dos grupos: (1) Protocolo 1, ejercicios estándar con pesos libres y (2) Protocolo 2, ejercicios con cadencias cambiantes con barras de resistencia. Un individuo se unió a los grupos de Protocolos 1 y 2 y fue evaluado de manera separada para evaluar el funcionamiento del equipo. Este sujeto realizó ejercicios estándar con las barras de resistencia compuestas. Luego de un período de dos semanas de familiarización con los protocolos, los sujetos comenzaron el programa de ejercicio de 17 semanas, 3 veces por semana con 60 a 90 minutos por sesión.

Se seleccionaron ejercicios considerados estándar para ejercitar las extremidades superiores e inferiores, torso anterior y posterior y pelvis. El Protocolo de ejercicios 1 incluía sentadilla, estocadas, press de banca, abdominales, y press de hombros. Los ejercicios del Protocolo 2 provenían de un protocolo de ejercicios intermedio ideado para atletas de velocidad y fuerza, tal como lo describen Maib y Tindall (12). Los ejercicios del Protocolo 2 fueron adaptados para simular el régimen de entrenamiento anterior con pesos libres, pero modificados a causa de las limitaciones del dispositivo de barras de resistencia utilizado en el estudio. Todos los protocolos involucraban un aumento progresivo en las cargas con 8 a 10 repeticiones. Luego de cada ejercicio se registró el peso y la resistencia utilizados por cada sujeto.

Se solicitó a los sujetos: (1) que consumieran la RDA recomendada de calcio (1000 a 1200 mg.día⁻¹ adecuada según edad y sexo); (2) que tomaran vitamina D (400 IU.día⁻¹); y (3) aprobaran con éxito un examen físico de Clase III modificada de FAA y realizaran un electrocardiograma (ECG) (si la edad lo requería). Se llevó un registro semanal del peso corporal, ingesta diaria de calcio y vitamina D.

Inmediatamente antes y después (pre y post) del programa de ejercicios se analizaron los marcadores bioquímicos de sangre y orina y se realizó una densitometría ósea (DEXA) (Perfil antero-posterior (AP) y laterales de caderas y columna lumbar).

Técnicas de Muestreo para el Análisis de los Marcadores Bioquímicos Óseos

Recolección, Envío y Almacenamiento de la Orina

Los sujetos recolectaron la orina de 24 horas en una jarra de plástico marrón limpia y calibrada. Una alícuota de 3 mL de orina fue extraída con una pipeta y fue colocada en un tubo de transferencia plástico que fue posteriormente sellado. No se utilizó ningún conservante para la orina, ni en la jarra ni en el recipiente plástico de transporte. La orina restante fue colocada en un cilindro graduado; los 3 ml extraídos como alícuota fueron agregados a éste volumen para obtener el volumen total de orina en las 24 hs. El tubo con la alícuota de orina fue empaquetado en *Styrofoam* y posteriormente sellado en una bolsa de seguridad biológica. Esta bolsa fue colocada en hielo seco, junto con un Registrador de Temperatura *Dickson*. El registrador documentó la temperatura a lo largo del transporte y registró la mayor temperatura a la que las muestras fueron expuestas.

Esto se utilizó para certificar que las muestras permanecieron a la temperatura requerida, inferior o igual a -70°C , durante el envío. Las muestras fueron enviadas a los laboratorios JSC de la NASA. Las muestras fueron mantenidas a $<-70^{\circ}\text{C}$ hasta su análisis. Todas las muestras fueron analizadas en el mismo momento, una vez que arribaran las muestras, pre- y post-ejercicio, para que se utilizara el mismo procedimiento de evaluación en todas las muestras.

Esto se realizó para evitar que se produjeran variaciones entre las determinaciones bioquímicas.

Recolección de Suero

La sangre fue extraída de la vena antecubital con una aguja 21G en un tubo con tapa roja estéril, de tipo *Becton Dickenson VACUTAINER Systems Franklin Lakes, NJ 07417-1885 (L10338-00, 366397, 3029306)* sin aditivos en su interior. Se dejó que la sangre se coagulara a la temperatura ambiente durante 15 minutos y luego fue centrifugada durante 15 minutos en el tubo con tapa roja. Inmediatamente después, con una pipeta se transfirió una alícuota de 2 mL de suero hacia un tubo plástico de traslado. El suero fue colocado en un paquete de *Styrofoam*, y luego enviado como se describió anteriormente, en hielo seco con un registrador de temperatura y fue almacenado a $<-70^{\circ}\text{C}$, hasta que se pudieran analizar simultáneamente las muestras pre- y post-ejercicio, en el mismo ensayo.

Análisis de Laboratorio de los Estudios en Suero

NTx: El procedimiento se realizó a través de un ensayo inmunoabsorbente competitivo (*Osteomark NTX Serum ELISA kit, Inverness Laboratories*). Las muestras de suero fueron analizadas para cuantificar los N telopéptidos enlazados del colágeno tipo I (NTx), con la ayuda de un anticuerpo monoclonal conjugado con peroxidasa de rábano. El NTx en la muestra compite con el epítipo de NTx por los sitios de unión al anticuerpo en un pocillo de microplaca.

Se determinó la absorbancia de la muestra mediante espectrofotometría, para luego calcular la concentración de NTx, utilizando una curva de calibración estándar. La variabilidad intra-ensayo fue de 4,6 %.

Osteocalcina

Para determinar la osteocalcina humana intacta en las muestras de suero, se empleó un kit inmunoradiométrico comercial de un solo sitio (Biomedical Technologies, Stoughton, Ma). Se utilizó osteocalcina humana marcada con yodo radioactivo (Osteocalcina-[YO-125]), en un proceso de competencia por los sitios de unión al anticuerpo de osteocalcina humano, entre la osteocalcina de la muestra y la osteocalcina patrón. Luego el complejo de unión radiactivo-anticuerpo se aisló mediante centrifugación y fue analizado en un contador de centelleo de rayos gamma. La concentración de osteocalcina fue calculada mediante extrapolación en la curva estándar generada en el ensayo. El coeficiente de variación de precisión intra-ensayo (CV) fue 6 % (límites de 95 %).

Fosfatasa Alcalina Ósea (BAP)

La BAP sérica fue medida mediante un enzimo-inmunoanálisis (*Quidel, San Diego*) en una placa para microensayos con una tira de pocillos, utilizando un anticuerpo monoclonal, anti-BAP, y la actividad catalítica de la enzima conjugada. Para detectar la unión de la BAP con el anticuerpo inmovilizado en la tira de pocillos se utilizó el sustrato llamado p-nitrofenil fosfato (pNPP) y luego se realizó la lectura de la reacción en un lector de microplacas de 96 pocillos. Los valores de BAP de la muestra desconocida fueron calculados a partir de una curva de la calibración ajustada con una ecuación cuadrática. El CV de precisión intra-ensayo varió de 3,9 a 5,8 %.

Análisis de Laboratorio de la Orina

N telopéptidos Enlazados del Colágeno Tipo I (NTx)

Los NTx fueron cuantificados en orina mediante un ensayo inmunoabsorbente de inhibición competitiva ligado a enzimas (*Osteomark NTX, Urine ELISA kit, Inverness Laboratories*). Esta prueba utiliza micropocillos en los cuales se absorben los NTx. Las concentraciones de NTx fueron determinadas mediante espectrofotometría y posteriormente calculadas a partir de una curva de calibración estándar. Los valores de la prueba fueron ajustados para la creatinina. El CV intra-ensayo fue 7,6 %.

Peptido Helicoidal (HelP)

Para capturar el péptido helicoidal (HelP) se empleó un enzimo-inmunoanálisis competitivo (*Quidel Corp, San Diego*) usando un anticuerpo monoclonal anti-péptido helicoidal inmovilizado en la tira de pocillos, para capturar el HelP. El conjugado formado entre el HelP y la fosfatasa alcalina fue utilizado para competir, por el anticuerpo, con el HelP presente en la muestra de orina. El antígeno marcado con la enzima, unido al anticuerpo, fue posteriormente detectado con p-nitrofenil fosfato según los procedimientos descritos por Taxel et. al (13). El CV intra-ensayo fue 4-8%. Los valores informados fueron ajustados según la concentración de creatinina en la orina.

Análisis Estadísticos

Los siguientes marcadores bioquímicos óseos fueron determinados en dos momentos; antes (pre) y después (post) de participar en el estudio: Osteocalcina, Fosfatasa Alcalina Específica de los Huesos (BSAP), N-telopéptidos enlazados del colágeno tipo I (NTx) en orina y suero, NTX / Creatinina y Péptido Helicoidal en orina. Todos los marcadores bioquímicos y los análisis de densitometría ósea (DEXA) fueron evaluados con un nivel de significancia de $p \leq 0,05$. Se compararon los marcadores bioquímicos óseos para cada sujeto con los parámetros nacionales, los valores pre y post fueron evaluados mediante un test-t de muestras apareadas donde cada sujeto fue considerado su propio control. Los análisis de DEXA fueron proporcionados como parte del proceso de presentación de informes sobre densidad mineral ósea (BMD) de *Hologic Inc.* donde los datos de los sujetos fueron comparados con los parámetros nacionales específicos para raza, género y edad. Las normas nacionales sobre cambios en la densidad mineral a lo largo del tiempo especificado, fueron utilizadas como control para los participantes del estudio.

RESULTADOS

Test	Probabilidad Ho
Osteocalcina	0,016*
BSAP	0,474
NTX Séricos	0,551
NTX/Creatina Urinario	0,327
Péptido Helicoidal	0,138

Tabla 1. Resultados del test-t realizado con los marcadores bioquímicos determinados en suero antes (pre) y después (post) del entrenamiento. Ho= Hipótesis nula; * $p < 0,05$.

Los cambios en los marcadores bioquímicos óseos (Tabla 1 y 2) demuestran que los sujetos presentaron aumentos significativos en el estímulo óseo para la osteocalcina en el suero y un aumento (no significativo) en el péptido helicoidal en orina luego de todos los regímenes de ejercicio. En la Tabla 2 se observa que el uso de barras de resistencia en el Protocolo 2 produjo un estímulo de formación de hueso y reducción en la resorción ósea similar a la del Protocolo 1 (pesos libres). El aumento en la osteocalcina y la reducción de los NTX en el suero (indicadores de las actividades de formación de hueso) fueron comparables en ambos protocolos. En la Tabla 2 se presentan los cambios en los valores séricos de osteocalcina, pre- y post ejercicio y en los mismos se observa la mayor similitud entre el Protocolo 2 (barra compuesta) y el Protocolo 1 (pesos libres). No se observaron diferencias significativas en los cambios en la osteocalcina ($p=0,937$ para la hipótesis nula) es decir, entre los dos regímenes de ejercicio (Tabla3).

Test	Pre		Post	
	Protocolo 1 (Pesos Libres; n=5)	Protocolo 2 (Barra; n=4)	Protocolo 1 (Pesos Libres; n=5)	Protocolo 2 (Barra; n=4)
Osteocalcina	11,7 ± 3,3	10,5 ± 2,1	14,9 ± 3,8	11,7 ± 3,2
BSAP	25,5 ± 7,4	19,4 ± 5,9	26,6 ± 8,1	18,6 ± 4,6
NTx Sérico	16,8 ± 3,6	16,5 ± 1,4	15,98 ± 4,72	15,8 ± 5,1
NTx/Creatina urinario	42,2 ± 17,6	36,7 ± 7,4	44,6 ± 19,4	45,6 ± 16,5
Péptido Helicoidal	347,4 ± 48,5	350,1 ± 149,1	408,8 ± 155,9	486,2 ± 353,6

Tabla 2. Marcadores bioquímicos óseos determinados antes (Pre) y después (Post) de realizar los entrenamientos.

Test	Probabilidad de la Ho
Osteocalcina	0,937
NTx/Creatinina Urinario	0,539

Tabla 3. Resultados del test-t de Student de los valores de osteocalcina y NTx/creatinina urinario obtenidos con los ejercicios con barras compuestas versus los ejercicios con pesos libres. Ho= Hipótesis nula.

No se observaron diferencias significativas entre los dos protocolos en los cambios en la densidad ósea de la parte izquierda de la cadera mediante el análisis DEXA (Figura 1). Se observaron diferencias significativas entre el grupo que realizó ejercicios con cadencias cambiantes en el Protocolo 2 y el grupo que realizó el Protocolo 1, en los valores correspondientes a la densidad ósea de la columna lumbar (Figura 2).

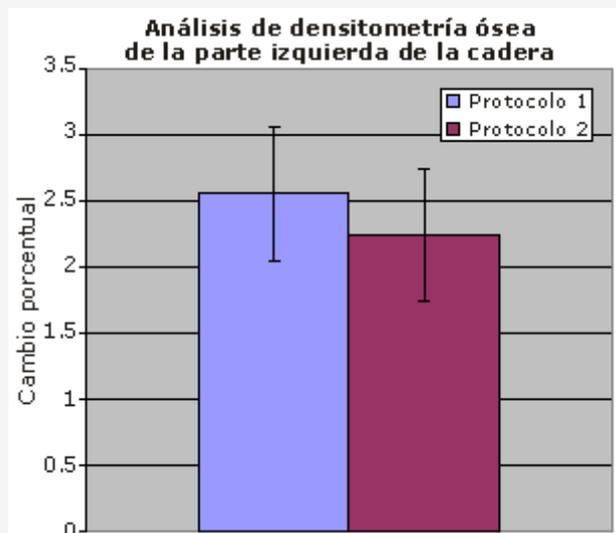


Figura 1. Comparación entre los protocolos, de los resultados correspondientes a la densitometría ósea (DEXA) de la cadera izquierda, expresados en forma de cambio porcentual medio en cada protocolo, Los valores se expresan en forma de Media±DS.

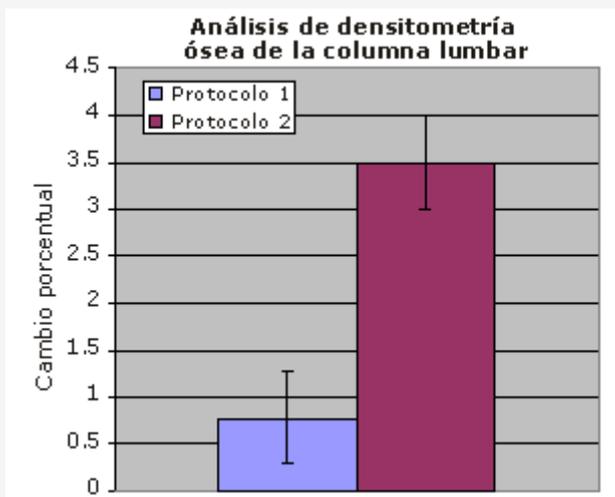


Figura 2. Comparación entre los protocolos, de los resultados correspondientes a la densitometría ósea (DEXA) de la columna lumbar, expresados en forma de cambio porcentual medio en cada protocolo, La significancia se estableció en un nivel de confianza de 95%, en comparación con los parámetros poblacionales. Los valores se expresan en forma de Media±DS.

Los valores de los marcadores bioquímicos óseos pre- y post-entrenamiento observados en el sujeto que debía evaluar los equipamientos fueron: NTx séricos (▼3,2); Osteocalcina (▼0,9); BSAP (▼10,8); NTx urinario (▼2,3); Péptido Helicoidal urinario (▲166).

El análisis DEXA de la cadera izquierda de éste sujeto no permitió extraer conclusiones debido que la postura no fue la correcta; en este individuo la región lumbar aumentó ~2,6% (diferencia significativa con un nivel de confianza de 95%). El objetivo del estudio consistió en comparar el Protocolo 1 versus el Protocolo 2. El propósito de utilizar éste sujeto fue evaluar la utilidad del equipo; por lo tanto, sus datos no fueron incluidos en el análisis global a causa a la falta de robustez debido a que era un grupo con un solo integrante.

DISCUSION

Sujetos

Un hombre abandonó antes de empezar el programa de ejercicios y una mujer lo hizo después de 10 semanas, ambos por razones personales no relacionadas con el estudio. Los otros sujetos (5 mujeres y 5 varones) realizaron completamente el entrenamiento requerido, de 3 sesiones por semana durante todo el estudio. Estos sujetos completaron el régimen entero y se les realizaron las valoraciones pre- y post-entrenamiento.

Determinaciones del Cambio Óseo

Marcadores Bioquímicos Oseos

Uno de las preocupaciones iniciales de este estudio era cómo rastrear la remodelación ósea a través de los cambios en la formación y resorción ósea, que se producen a corto plazo en los sujetos. Se acepta que los marcadores bioquímicos óseos son clínicamente válidos y generalmente proporcionan una valoración más rápida del estado de los huesos, en comparación con otras técnicas como el análisis DEXA (14). Esta metodología aportaría una visión más dinámica de la producción de hueso como resultado de las intervenciones y se ha demostrado que aporta resultados mensurables en solo seis semanas después de la intervención (15). Los marcadores bioquímicos óseos y de calcio en el hueso, analizados antes y después de un viaje espacial de larga duración (4 a 6 meses) indican que la pérdida ósea durante el vuelo espacial se produjo como consecuencia de una mayor resorción ósea y de una menor absorción de calcio intestinal (16). Es útil tener datos para establecer comparaciones posteriores.

Luego del entrenamiento (Post) se observaron cambios significativos en la osteocalcina y otros marcadores bioquímicos óseos en todos los grupos, lo que indicaría que en todos los sujetos se estaba produciendo remodelación ósea. Un hallazgo

importante de este estudio fue que los cambios en la osteocalcina no fueron diferentes entre los dos protocolos. Esto es importante, ya que los pesos libres son considerados la metodología estándar con la cual se comparan todos los otros equipos y regímenes. Así, los resultados indican que el uso del dispositivo con barras de resistencia es tan beneficioso como el uso de pesos libres. Esto también es importante debido a las limitaciones que tiene el uso de pesos libres en el espacio y en las personas mayores (traslado de peso controlable). Sin embargo, es importante señalar que en este estudio, el péptido helicoidal (producto de la degradación del hueso) que es indicativo de la degradación ósea (13) no presentó cambios significativos entre ambos protocolos. Son necesarias evaluaciones adicionales para determinar si este hallazgo, es un resultado de la fase de remodelación (resorción versus formación) en la que los sujetos fueron evaluados. Este régimen puede favorecer una fase de remodelación por sobre las otras.

Como mencionamos en la introducción y luego discutimos en el régimen de ejercicio, el traslado de peso de alto impacto, alta intensidad y ejercicios planteados adicionalmente sobre sitios específicos han demostrado algunos efectos positivos manteniendo o incrementando modestamente la BMD (7-10,17-22). Este estudio refleja que los protocolos con ejercicios específicos no sólo pueden mantener la densidad ósea y muscular, si no que también pueden aumentarla substancialmente.

Este resultado es importante para los viajes espaciales de larga duración dónde los astronautas deben permanecer durante largos períodos de tiempo en microgravedad. Se ha observado, que si se comienza con BMD iniciales menores se producen aumentos mayores en BMD (23). Así, si se utilizan los protocolos de este estudio con ancianos y con personas a quienes previamente se les ha diagnosticado osteoporosis u osteopenia, podrían obtenerse incrementos aun mayores en la BMD en la tierra, debido a la mayores cargas intrínsecas relacionadas a la gravedad (como el peso del cuerpo) y a una menor BMD inicial. Sin embargo, se necesitarán investigaciones adicionales para evaluar y adaptar estos protocolos y así, determinar los efectos del equipamiento en estas poblaciones.

Análisis DEXA

La densitometría ósea (DEXA) es el método más ampliamente usado para medir la BMD. Puede utilizarse para documentar pequeños cambios en la masa ósea de la columna y las extremidades. La tomografía computada cualitativa también fue considerada, ya que puede medir la densidad y volumen del hueso distingue el hueso trabecular del cortical. Sin embargo, es muy costosa; su uso está menos documentado y expone a los sujetos a dosis de radiación mucho más altas que DEXA. La DEXA es más económica y su exactitud para medir los cambios sutiles que se producen con el tiempo en la densidad de los huesos ha sido ampliamente demostrada (24).

Está ampliamente reconocido que la densidad mineral ósea es un buen indicador de la fuerza del hueso. Se han comparado valores bajos de BMD con las mediciones estándar de densidad ósea utilizadas, para ayudar a predecir el riesgo que tiene un sujeto de sufrir una fractura en base a mediciones con DEXA (25). Diferentes estudios han demostrado un cambio positivo promedio de 1 a 2% por año en BMD luego de ciertos regímenes de ejercicio o programas de entrenamiento (17, 26). En este estudio los sujetos que realizaron el protocolo 2 presentaron un rango promedio de variación en la BMD que iba de 2% en el región izquierda de la cadera a 3,5% en la columna lumbar, luego del período de intervención de 17 semanas. Esto, indicaría probablemente una tasa mayor de incremento en la densidad mineral ósea (BMD) que generalmente se atribuye a otros programas de ejercicio.

Modalidad de Ejercicio

Tipo de Régimen

Se ha demostrado que los ejercicios con cadencias cambiantes son efectivos en ratas (22) y en mujeres pre-menopáusicas que realizaron un régimen de ejercicios con saltos verticales (17). Los estudios han demostrado que hay una correlación entre el tipo de ejercicio y el aumento en la densidad ósea (20, 21).

Por ejemplo, se ha demostrado que los ejercicios de alto impacto aumentan o mantienen la BMD en los individuos (17). En vez de prescribir a los participantes del estudio, un programa de ejercicios con circuitos generales, el protocolo de ejercicios incluyó una variedad de ejercicios destinados a grupos musculares específicos. Se puso énfasis principalmente en los músculos asociados con la cadera, columna lumbar, piernas, pecho y brazos. La cadera, pelvis, piernas y región lumbar de la columna son de particular interés debido a la pérdida ósea y disminución en la densidad muscular que se observa en estas áreas en los individuos durante un viaje espacial (27, 28) o en los individuos que padecen riesgo de sufrir osteoporosis, la cual produce morbilidad y mortalidad a largo plazo. Además, puede ser muy difícil devolver a los astronautas la capacidad de realizar ejercicios nuevamente en presencia de gravedad, debido a la pérdida de músculo y hueso que se produce en el espacio. La mayor debilidad muscular y fragilidad ósea, también pueden facilitar la producción de fracturas en los huesos. Hay estudios que han informado una correlación entre la osteoporosis y las fracturas, a causa de la disminución significativa de la densidad ósea (29). Por ejemplo, las fracturas de compresión vertebral afectan aproximadamente entre un 25 y 40% de todas las mujeres postmenopáusicas de EEUU, dependiendo la edad (30). Un hallazgo importante de este estudio fue el aumento significativo en la densidad de la región de la columna lumbar, luego de

la participación de los sujetos en el protocolo 2 de ejercicios.

Equipamiento

Se ha demostrado que la intensidad del ejercicio se correlaciona de manera positiva con la BMD (31). El dispositivo con barras de resistencia compuestas se usó con el fin de aumentar la intensidad y foco de los ejercicios. Se ha sugerido que la tasa de fuerza aplicada puede ser un factor importante en la efectividad del ejercicio (32). En este estudio el protocolo 2 fue diseñado teniendo en cuenta tanto el aumento en la intensidad del ejercicio como el de la tasa de aplicación de fuerza. De hecho, el Dispositivo de Resistencia Intermedio usado en la estación Espacial Internacional fue comparado con la máquina de ejercicios *Smith* (33) para determinar las diferencias entre las fuerzas de reacción contra el suelo. Tales comparaciones sugieren que es probable, que la dinámica estructural del tipo de equipo y los torques relacionados que se producen, probablemente afecten la localización de la tensión mecánica sobre grupos musculares específicos.

En este estudio, la combinación entre el diseño del equipo y el protocolo de ejercicio, parecería haber aumentado las cargas de fuerza en los músculos de la región lumbar, aumentando así la estimulación de las estructuras óseas vertebrales asociadas y subordinadas. Las barras compuestas usadas en este estudio produjeron cargas de 140 kg que eran ligeramente superiores a los 136 kg informados para iRED (25). Dado que el tamaño de los astronautas aumenta, serán necesarios equipos que puedan producir cargas más altas para mantener la resistencia adecuada en las extremidades inferiores. Los equipos con barras compuestas usados en este estudio pueden ser modificados para producir cargas que superen los 180 kg. En el Protocolo 1 se utilizaron pesos libres estándar. Es necesario realizar estudios cualitativos y cuantitativos adicionales, para evaluar los efectos de diferentes diseños de equipos sobre la estimulación ósea.

Conclusiones

Esta investigación preliminar indica que el uso de dispositivos de barras compuestas junto con el régimen de ejercicios del Protocolo 2, tiene el potencial de aportar un beneficio significativo tanto para astronautas en microgravedad, como para ancianos donde el uso de pesos libres puede ser perjudicial, poco práctico o incluso imposible. El equipo de barras compuestas se muestra prometedor como equipo de apoyo del Dispositivo de Ejercicios de Resistencia Intermedia (iRED) de la NASA y un futuro, como dispositivo para viajes espaciales de larga duración tales como el Dispositivo de Ejercicios de Resistencia Avanzada (ARED). Con el Protocolo 2 (barras de resistencia y ejercicios modificados) se observaron resultados comparables con los del Protocolo 1 (pesos libres) en la formación de hueso.

Esta combinación de equipo de barra de resistencia y cadencia de ejercicios variable (Protocolo 2) debería ser investigada con detalle para comprobar si aumenta la densidad ósea vertebral en los individuos con osteoporosis y osteopenia incluyendo mujeres post-menopáusicas y varones de edad avanzada, quienes presentan un riesgo elevado. La revisión de los datos del supervisor del equipo, sugiere que, la adición de un grupo control, que realice ejercicios estándar en el equipo barras compuestas, podría ayudar a separar los efectos del equipo, de los del régimen de ejercicios. Recomendamos la realización de estudios adicionales, para evaluar la necesidad de adaptar el equipo a las consideraciones de seguridad y tamaño para viajes espaciales, junto con estudios que realicen comparaciones con las bandas elásticas que se utilizan en la actualidad y con el iRED.

Agradecimientos

Soporte técnico: Agradecemos especialmente a Scott Smith (*NASA JSC Laboratory*) por los análisis de marcadores bioquímicos óseos de suero y orina; a Linda Shackelford (*NASA JSC Bone Mineral Laboratory*) por el Patrocinio de la Beca de Verano de la Facultad de la NASA (2002); a Dana Morganroth (*Life Measures Laboratory*); Mary Ann Barrick (*Hologic Inc.*); Steve Steckel por su cooperación con la bioestadística; al *Pointe Athletic Club (Lakewood, CO)*; y *Nautilus Inc.*; Dr. Glenn Cosh, de *Lakewood Family Medicine*. Agradecemos también a los revisores y a Dean Anderson y Julia Gordon por su apoyo.

Dirección para Envío de Correspondencia

K.E. McAlpine, Denver Research Institute, University of Denver, 30953 Ruby Ranch Road, Evergreen, CO 80439, correo electrónico: kemcalpine@yahoo.com.

REFERENCIAS

1. Space Studies Board Division on Engineering and Physical Sciences Review of NASA Plans for the International Space Station (1940). Review of NASAs Longitudinal Study of Astronaut Health, NASA Strategic Roadmaps: Space Station Panel. Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council of the National Academies. *Press, Washington, D.C., [Online]. <http://www.nap.edu>*
2. Hullander D. and Barry P. L (2003). [Space Bones] FirstScience.com. [Online]. <http://www.firstscience.com>
3. LeBlanc A., Schneider V., Shackelford L., West S., Organov V., Bakulin A., Voronin L (2000). Bone Mineral and lean tissues loss after long duration space flight. *Musculoskeletal Neuron Interact*;1(2):157-160
4. NationalOsteoporosisFoundation (2006). [FastFacts];[Online]. <http://www.nof.org/osteoporosis/diseasefacts.htm>
5. Cooke W. H., Ames I. V. J. E., Crossman A. A., Cox J. F., Kuusela T. A., Tahvanainen K. U. O., Moon L. B., Drescher J., Baisch F. J., Mano T (2000). Levine B. D., Blomqvist C. G. and Eckberg D. L. Nine months in space: effects on human autonomic cardiovascular regulation. *J Appl Physiol*; 89: 1039-1045
6. McArdle W. D., Katch F. I. and Katch V. L (2001). Exercise Physiology (5th Ed): Energy, Nutrition, and Human Performance. *New York: Lippincott, Williams, and Wilkins*
7. Vainionpaa A., Korpelainen R., Leppaluoto J. and Jamsa T (2005). Effects of high-impact exercise on bone mineral density: a randomized controlled trial in premenopausal women. *Osteoporosis Int*; 16: 191-197
8. Kelley G. A., Kelley K. S. and Vu Tran Z (2000). Exercise and bone mineral density in men: a meta- analysis. *J Appl Physiol*; 88 (5):1730-1736
9. Stengel S. V., Kemmler W. K., Pintag R., Beeskow C., Weineck J., Lauber D., Kalender W. A. and Engelke K (2005). Power training is more effective than strength training for maintaining bone mineral density in postmenopausal women. *J Appl Physiol*; 99: 181-188
10. Maddalozzo G. F. and Snow C. M (2000). High Intensity Resistance Training: Effects on Bone in Older Men and Women. *Calcified Tissue International*; 6: 399-404
11. Warburton D. E. R., Nicol C. W. and Bredin S. S. D (2006). Health benefits of physical activity: the evidence. *CMAJ*; 174 (6):801-809
12. Maib D. E. and Tindall J. A (1997). Speed-Strength Training for Martial Artists: Mind- Body Link. *Summerville, Tenn: Wahala Publishing*
13. Taxel P., Fall P. M., Prestwood K. M., Dulipsingh L., Dauser D., Ohannessian C. and Raisz L. G (2004). Changes in urinary excretion of helical peptide during therapy for osteoporosis in older adults. (Technical Brief). *Clinical Chem*; 50 (4): 747-750
14. Rosen C. J. and Tenenhouse A (1998). Biochemical markers of bone turnover: A look at laboratory tests that reflect bone status. *Postgraduate Medicine* 104 (4): 101-118
15. Wilkinson J. M., Eagleton A. C., Stockley I., Peel N. F. A., Hammer A. J. and Eastell R (2006). Effect of pamidronate on bone turnover and implant migration after total hip arthroplasty: A randomized trial. *J Orthopaedic Res*; 23 (1): 1-8
16. Bassey E. J., Rothwell M. C., Littlewood J. J. and Pye D. W (1998). Pre- and postmenopausal women have different bone mineral density responses to the same high-impact exercise. *J Bone Mineral Res*; 13(12):1805-1813
17. Etherington J., Harris P. A., Nandra D., Hart D. J., Wolman R. L., Doyle D. V. and Spector T. D (1996). The effect of weight-bearing exercise on bone mineral density: a study of female ex-elite athletes and the general population. *J Bone Mineral Res*; 11: 1333-1338
18. Menkes A., Mazel S., Redmond R., Koffler K., Libanati, Gunderberg C., Zizic T., Hagberg R., Pratley and Hurley B (1993). Strength training increases regional bone mineral density and bone remodeling in middle [aged and older men. *J Appl Physiol*; 74: 2478-2484
19. Duncan C. S., Blimkie C. J., Cowell C. T., Burke S. T., Briody J. N. and Howman-Giles R (2002). Bone mineral density in adolescent female athletes: relationship to exercise type and muscle strength. *Med Sci Sports Exerc*; 34: 286-294
20. Morel J., Combe B., Francisco J. and Bernard J (2001). Bone mineral density of 704 amateur sportsmen involved in different physical activities. *Osteoporosis Int*; 12: 152-157
21. Umemura Y., Ishiko T., Yamauchi T., Kurono M. and Mashiko S (1997). Five jumps per day increase bone mass and breaking force in rats. *J Bone Mineral Res*; 12: 1480-1485
22. Winters-Stone K. M. and C. M (2003). Snow. Musculoskeletal Response to Exercise Is Greatest in Women with Low Initial Values. *Med. Sci. Sports Exerc* 2003; 35: 1691-1696
23. Baim S., Wilson C. R., Lewiecki E. M., Luckey M. M., Downs R. W. (Jr) and Lentle B. C (2005). Precision assessment and radiation safety for dual-energy e-ray absorptiometry (DXA). *ISCD*; 8 (4):1-13
24. Kowalchuk R. M. and Dalinka M. K (1998). The radiologic assessment of osteoporosis. *UPQJ*; 11: 67-72
25. Wolff I., van Croonenborg J. J., Kemper H. C. G., Kostense P. J. and Twisk J. W. R (1999). The effect of exercise training programs on bone mass: a meta-analysis of published controlled trials in pre- and postmenopausal Women. *Osteoporosis Intl*; 9(1):1-12
26. Collet V. L., Guignandon A., Lafage-Proust M. H., Thomas T., Rehaillia M. and Alexandre C (2000). Effects of long-term microgravity exposure on cancellous and cortical weight-bearing bones of cosmonauts. *Lancet*; 355: 1607-1611
27. Lang T., LeBlanc A., Evans H., Lu Y., Grenant H. and Yu A (2004). Cortical and trabecular bone mineral loss from the spine and hip in long-duration spaceflight. *J Bone Miner Res* 2004; 19 (6): 1006-1012
28. Siris E. S., Miller P. D., Barrett-Connor E., Faulkner K. G., Wehren L. E., Abbott T. A., Berger M. L., Santora A. C. and Sherwood L. M (2001). Identification and Fracture Outcomes of Undiagnosed Low Bone Mineral Density in Postmenopausal Women: Results from the National Osteoporosis Risk Assessment. *JAMA*; 286: 2815-2822

29. Melton L. J (1997). 3rd. Epidemiology of spinal osteoporosis. *Spine:22 (24 Suppl):2S-11S*
30. Vainionpaa A., Korpelainen R., Vihriala E., Rinta-Paavola A., Leppaluoto J. and Jamsa T (2006). Intensity of exercise in associated with bone density change in premenopausal women. *Osteoporosis Int; 17(3):455-63*
31. Morrissey M. C., Harman E. A. and Johnson M. J (1995). Resistance training modes: specificity and effectiveness. *Med. Sci. Sports Exerc 1995; 27 (5): 648-660*
32. Amonette W. E., Bentley J. R., Lee S. M. C., Loehr L. A. and Schneider S (2004). Ground reaction force and mechanical differences between the interim resistive exercise device (iRED) and Smith machine while performing a squat. *NASA Technical Report TP-2004-212063*

Cita Original

McAlpine K.E., Tindall J.A. Effects of Equipment and Exercise Protocol on Bone Remodeling and Formation Stimulation. *JEPonline 12 (3): 42-53, 2009.*