

Research

Rendimiento Durante Ejercicios Dinámicos en Atletas Masters: Ideas acerca de los Principales Efectos del Envejecimiento Humano sobre la Capacidad Fisiológica Funcional

Hirofumi Tanaka¹ y Douglas R Seals²¹Department of Kinesiology and Health Education, University of Texas at Austin, Austin, Texas 78712.²Department of Integrative Physiology, University of Colorado at Boulder, Boulder, Colorado 80309.

RESUMEN

La capacidad fisiológica funcional (PFC) se define aquí como la capacidad para realizar las tareas físicas de la vida diaria y la facilidad con la cual estas tareas pueden ser realizadas. En la década pasada, hemos tratado de determinar el efecto principal (en individuos sanos) del envejecimiento humano sobre la PFC y las potenciales influencias moduladoras del sexo y la realización habitual de ejercicios aeróbicos sobre este proceso, estudiando a atletas jóvenes y ancianos. Un enfoque inicial para determinar los efectos del envejecimiento sobre la PFC implicó la investigación de los cambios en el pico de rendimiento durante el ejercicio con el envejecimiento en atletas altamente entrenados y atletas competitivos. La PFC, valorada por medio del rendimiento durante carreras o durante la natación, se reduce solo modestamente hasta la edad de 60-70 años, pero declina exponencialmente a partir de esta edad. Una progresiva reducción en el consumo máximo de O₂ (VO₂máx.) parece ser el mecanismo fisiológico principal asociado con las reducciones en el rendimiento de resistencia con el avance de la edad, conjuntamente con una reducción en la velocidad a la que se realiza ejercicio a la intensidad del umbral de lactato. Debido a que el VO₂máx. es importante para mediar las reducciones relacionadas con la edad en el rendimiento durante el ejercicio y en la PFC, hemos por lo tanto investigado, la influencia moduladora del nivel habitual de ejercicio aeróbico sobre la tasa de reducción del VO₂máx. con la edad. Sorprendentemente, el grupo de los adultos entrenados en resistencia parecen sufrir mayores tasas absolutas de declinación en el VO₂máx. con el avance de la edad en comparación con los adultos sedentarios. Esto parece estar mediado por un efecto que se debe al nivel inicial (mayor VO₂máx. cuando eran adultos jóvenes) y/o por una reducción marcada, en relación a la edad, en el volumen e intensidad del entrenamiento (estímulo) en los adultos entrenados en resistencia. Por lo tanto la capacidad para mantener los niveles habituales de actividad física con el avance de la edad parece ser un factor determinante en los cambios en la PFC, en parte por medio de la modulación de la capacidad aeróbica máxima.

Palabras Clave: consumo máximo de oxígeno, sexo, actividad física

"En el estudio de la fisiología del ejercicio muscular hay una vasta reserva de información acumulada en los récords de los deportes y las carreras atléticas". A.V. Hill, 1925 (24).

La capacidad fisiológica funcional se define aquí como la capacidad para realizar tareas físicas de la vida diaria y la facilidad con la cual estas tareas pueden llevarse a cabo. La PFC declina hasta cierto punto con el avance de la edad

incluso en adultos saludables, resultando en una reducción de la capacidad para realizar ciertas tareas físicas. Esto puede eventualmente resultar en un incremento en la incidencia de discapacidad funcional, incremento en la utilización de servicios de cuidado de la salud, pérdida de la independencia, y reducción de la calidad de vida (3, 5, 15). Además, la declinación en la PFC provoca serias amenazas a los individuos que tienen ocupaciones físicamente demandantes (59). Debido a que no podemos cambiar las demandas físicas de nuestro trabajo diario, la reducción en la PFC significa que los trabajadores ancianos trabajan cerca del máximo de su capacidad, lo que podría resultar en eventos cardiovasculares agudos, fatiga crónica, y otros problemas de salud (e.g., problemas ortopédicos) (59). Se espera que esta situación empeore en el futuro dado que las actuales proyecciones indican un incremento en la población de ancianos en los Estados Unidos y en otros países industrializados.

En la década pasada, hemos tratado de determinar los efectos (en individuos sanos) del envejecimiento humano sobre la PFC, y las influencias moduladoras potenciales del sexo y el nivel habitual de ejercicio aeróbico sobre este proceso, estudiando a adultos jóvenes y a atletas masters (12-14, 16, 41, 51-55, 60). El propósito de esta revisión es discutir y sintetizar los hallazgos en estos trabajos de investigación originales. El foco de la presente revisión se limita al rendimiento de grandes grupos musculares durante ejercicios dinámicos de duración corta y prolongada; por lo tanto la "expresión" PFC queda determinada principalmente a la capacidad de realizar este tipo de actividad. La mayor parte de la información presentada fue obtenida de observaciones transversales de atletas de diferentes edades, aunque también se discuten resultados de análisis longitudinales (12, 13).

CAMBIOS EN EL PICO DE RENDIMIENTO DURANTE EL EJERCICIO CON EL ENVEJECIMIENTO

Modelo Experimental

La determinación de los efectos del envejecimiento biológico per se sobre la PFC en humanos es difícil debido a que la interpretación se confunde con las reducciones correspondientes en los niveles de actividad física (desacondicionamiento), cambios en la composición corporal (i.e., incrementos en la grasa corporal y reducciones en la masa libre de grasa), y el desarrollo de enfermedades clínicas, todo lo cual reduce la PFC independientemente del proceso intrínseco de envejecimiento. Debido a estas limitaciones, un nuevo enfoque para determinar los efectos del envejecimiento sobre la PFC en humanos constituye determinar los cambios en el pico de rendimiento durante el ejercicio con el envejecimiento en atletas competitivos y en atletas altamente entrenados (11, 12, 24, 29, 34, 55). La teoría es que estos atletas representan un modelo experimental efectivo, debido a que se cree que los cambios observados con el avance de la edad reflejan principalmente los resultados principalmente del envejecimiento (fisiológico). Además, 1) el pico de rendimiento de estos atletas se establece bajo condiciones rigurosamente estandarizadas, particularmente a nivel de eventos de campeonatos; y 2) se asume que la automotivación, un factor determinante de la capacidad para determinar con precisión el pico de rendimiento, esta cerca del máximo bajo estas condiciones. Utilizando los récords deportivos, el premio Nobel A. V. Hill originalmente utilizó esta estrategia experimental para examinar la relación entre la velocidad máxima y la distancia de carrera en varios eventos atléticos (24). Desde entonces, numerosas investigaciones han estudiado los cambios relacionados con la edad en la PFC examinando principalmente el rendimiento en carreras de resistencia.

Edad y Rendimiento en Carreras

Utilizando este enfoque, nosotros (11, 54) y otros investigadores (9, 29, 35) hemos establecido que el rendimiento en carreras de resistencia se reduce con la edad de manera curvilínea (Figura 1). Específicamente, el rendimiento se mantiene hasta los ~35 años de edad, seguido por un modesto incremento en los tiempos de carrera hasta los 50-60 años de edad, con incrementos progresivamente más marcados a partir de esta edad y en adelante. Esta reducción en el rendimiento es hasta tres veces mayor en las mujeres en comparación con los hombres, produciéndose las mayores diferencias después de los 60 años de edad (11). Esta tasa de declinación en el rendimiento de resistencia aparentemente más rápida con el avance de la edad en la mujer puede tener bases biológicas. Sin embargo es también posible que factores independientes del envejecimiento fisiológico (e.g., influencias sociológicas) puedan contribuir a estas diferencias. Por ejemplo, el aumento de las diferencias sexuales con el avance de la edad puede ser explicado parcialmente por la participación de un menor número total de corredoras en los grupos de mayor edad (i.e., sesgo de selección) (29). En base a nuestro trabajo con nadadores competitivos al menos parte de las diferencias relacionadas con el sexo en el rendimiento con el envejecimiento pueden atribuirse a este factor (ver más abajo).

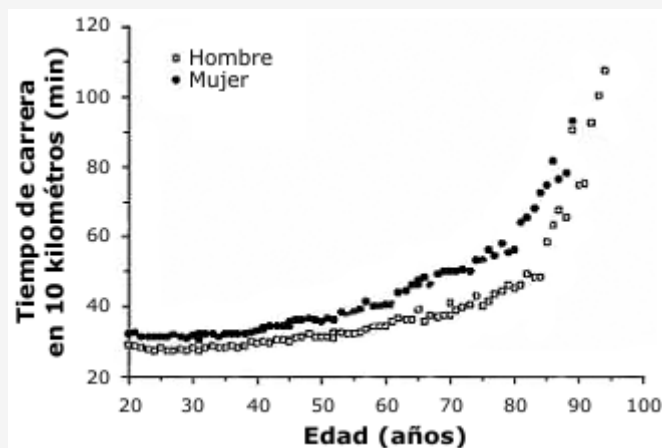


Figura 1. Tiempos de carrera en diez kilómetros con el avance de la edad (de la Ref. 54).

Envejecimiento y Rendimiento en Natación

Como siguiente paso, hemos examinado el rendimiento en natación con el avance de la edad (12, 55). Hemos razonado que podríamos tener más confianza en los datos obtenidos en la carrera si estos resultados podían ser confirmados con otros tipos de actividades físicas. Los análisis del rendimiento en natación proporcionan varias ventajas para el estudio del envejecimiento y la PFC. Primero, la natación es una actividad en donde no hay que soportar el peso corporal y tiene una incidencia relativamente baja de lesiones ortopédicas incluso entre los ancianos (32, 33). Esto es particularmente importante debido a que la interpretación de las reducciones en el rendimiento durante el ejercicio puede confundirse por el incremento en la incidencia de lesiones ortopédicas con el avance de la edad. Segundo, a diferencia de muchos eventos atléticos en los cuales los participantes varones son mucho más numerosos que las mujeres (e.g., en las carreras), se sabe que en la natación hay una tasa equivalente de participación de varones/mujeres (55), lo cual minimiza el factor de confusión “sociológico” en la interpretación de los resultados sobre las interacciones sexo-edad en la PFC. En primer lugar hemos realizado un análisis transversal retrospectivo de los tiempos de rendimiento en estilo libre, los cuales fueron recolectados durante campeonatos de Natación Masters de los EE.UU. (55). Dadas las limitaciones inherentes a las comparaciones transversales, realizamos un estudio longitudinal llevando a cabo un seguimiento de 321 mujeres y 319 hombres quienes llevaban 12 años participando en Campeonatos Masters de Natación en los EE.UU. (12).

Especificidad de la Tarea

De manera similar al rendimiento en la carrera, la PFC valorada a través del rendimiento en la natación, declinó con el avance de la edad de manera curvilínea tanto en mujeres como en hombres (55) (ver Figura 2). Sin embargo, hemos observado que el patrón de declinación era algo diferente del observado en la carrera de larga distancia. La magnitud de la reducción global en el rendimiento en natación con el avance de la edad era de hasta un 30% menor que la observada en el rendimiento en la carrera. Además, la edad a la cual comenzaba a ocurrir la declinación exponencial aparecía más tarde en la natación (~70 años) en comparación con la carrera (~60 años) (55). Estos hallazgos respaldan la idea de que los cambios asociados con la edad en las mediciones de la PFC derivadas del rendimiento pueden ser influenciados por la tarea en la que está implicado el individuo.

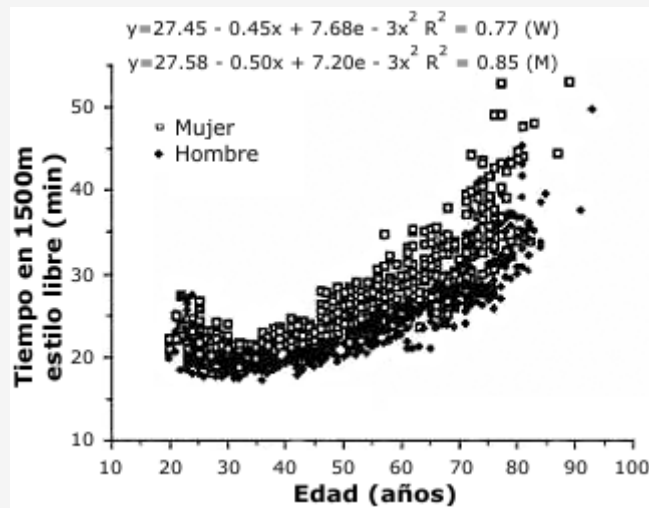


Figura 2. Natación en atletas Masters de los EE.UU.: tiempos de rendimiento en 1500 m con el avance de la edad (de la Ref. 55).

Las razones de estas diferencias específicas de la tarea no son claras, pero podrían ser explicadas por medio de la observación de que el rendimiento en la natación es relativamente más dependiente de la técnica biomecánica en comparación con la carrera (10). No es poco común ver a nadadores Masters alcanzar su mejor tiempo personal a los 40-50 años de edad (9). Una explicación alternativa es la baja incidencia de lesiones ortopédicas durante la natación en comparación con las carreras. La declinación en el rendimiento de carrera con el envejecimiento ha sido parcialmente atribuida al incremento en la incidencia de lesiones ortopédicas, las cuales limitan el volumen de entrenamiento de los corredores ancianos (13, 29, 42). Por lo tanto el rendimiento en la natación puede desmejorar con la edad, pero en un grado mucho menor debido a este factor. Otra posibilidad es que, debido a que el entrenamiento de la natación es principalmente fraccionado, puede mantenerse una mayor intensidad de entrenamiento con el avance de la edad lo cual pudo haber contribuido a la menor declinación de la PFC en los nadadores.

Interacciones Edad-Sexo en el Rendimiento durante el Ejercicio

En el estudio transversal, hemos hallado que la tasa de declinación en el rendimiento en la natación fue mayor en las mujeres que en los hombres en todos los eventos analizados (55) (Figura 2). Sin embargo, la interpretación de dichas comparaciones transversales de los tiempos de rendimiento a través de la edad debe hacerse cuidadosamente. Es posible que factores independientes a los verdaderos cambios fisiológicos provocados por el envejecimiento puedan influenciar los resultados. De hecho, en el estudio longitudinal de seguimiento, la diferencias sexuales en las declinaciones relacionadas con la edad en el rendimiento en natación solo fueron evidentes en los eventos de corta duración (i.e., eventos de velocidad); mientras que dicha diferencia no fue observada en los eventos de larga duración (eventos de resistencia) (12) (Figura 3). Es posible que la declinación asociada con la edad en los determinantes fisiológicos del rendimiento de velocidad y de resistencia pueda ocurrir a diferentes tasas en hombres y mujeres. Con respecto a esto, las tasas relativas de declinación en el consumo máximo de oxígeno ($VO_{2\text{máx.}}$; uno de los factores principales que determinan el rendimiento en la natación de resistencia) son similares entre hombres y mujeres (26), mientras que las mujeres parecen experimentar una mayor declinación en la fuerza y en la potencia muscular (factores principales que determinan el rendimiento de velocidad) particularmente en las extremidades superiores, en comparación con los hombres (40, 49).

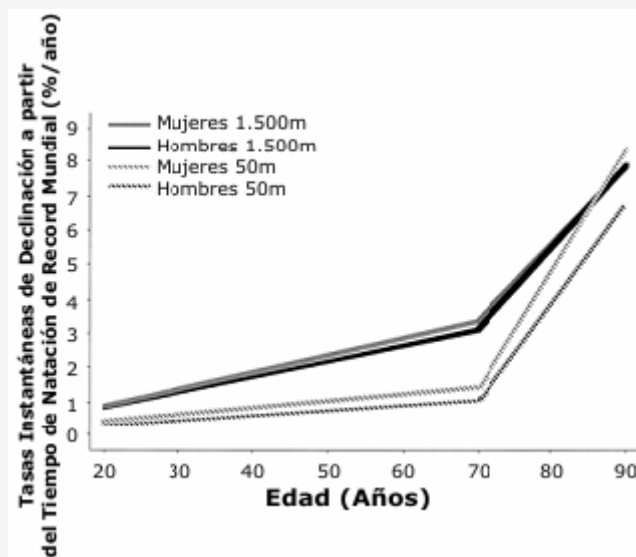


Figura 3. Tasas instantáneas de cambios en los tiempos de rendimiento en natación en relación con los récords mundiales actuales. Para cada distancia las curvas de las mujeres son las líneas superiores (de la Ref. 12).

En efecto, uno de los patrones más intrigantes que descubrimos fue que las diferencias sexuales en el rendimiento en natación eran mayores en los eventos más cortos y se volvían progresivamente menores con el incremento de la distancia (55) (Figura 4). No hemos observado esta clase de tendencia dependiente de la distancia o dependiente de la duración del ejercicio en la carrera o en otros deportes (55) (Figura 4). Una explicación fisiológica para las menores diferencias sexuales con el incremento en la distancia de natación es que el costo de oxígeno de la natación ha mostrado ser menor (i.e., más económico) para las mujeres que para los hombres como resultado de su menor tamaño corporal (lo que resulta en una menor resistencia al arrastre), menor densidad corporal (lo que resulta en una mayor flotación), mayor grasa corporal, y piernas más cortas (lo que resulta en una posición más horizontal y alineada con la corriente) (31, 39). Debido a esto, las mujeres tienen una mayor capacidad de conservar las reservas corporales de energía durante los eventos de natación de mayor duración. Irónicamente, estos son los factores fisiológicos que limitan el rendimiento de las mujeres en otros eventos deportivos. Sin embargo en los eventos de largas distancias en natación estas diferencias pueden actuar a su favor (52).

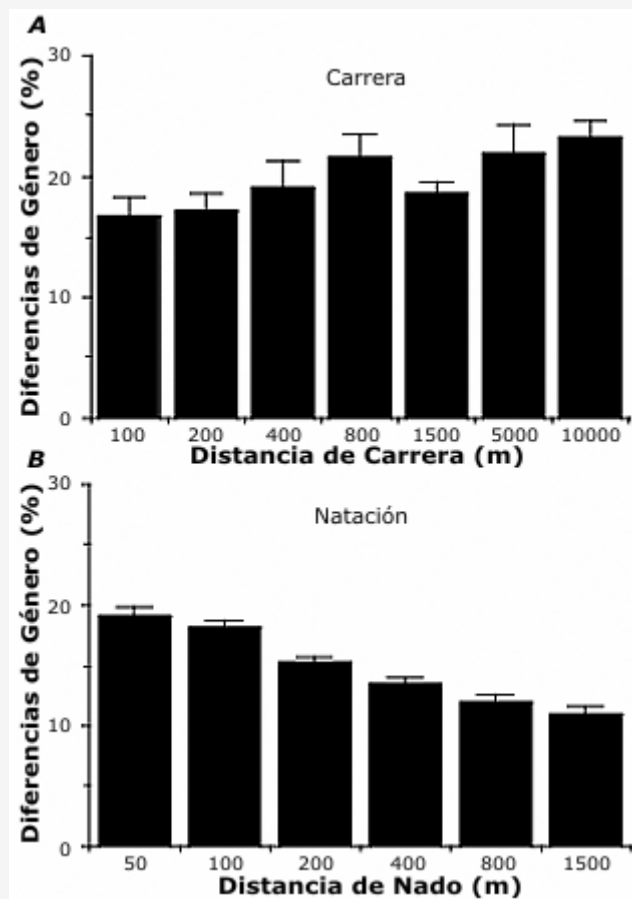


Figura 4. Diferencias de género (%) en el rendimiento en función de la distancia del evento. A: Carrera, B: Natación (de la Ref 55).

Es tentativo hipotetizar que las diferencias sexuales pueden continuar reduciéndose a medida que se incrementa la distancia de nado. En base a la extrapolación de la recta de regresión que hemos construido y a la reconversión de la escala logarítmica a la escala numérica normal, la distancia proyectada de nado en la que la mujer sobrepasaría al hombre es de ~25km (52; Figura 5). En este contexto, es interesante señalar tres hechos importantes que respaldan nuestra hipótesis. Primero, en el más reciente campeonato del *Ironman*, las diferencias sexuales en el rendimiento en natación fueron <1% (en la carrera y en el ciclismo las diferencias fueron >10%). Segundo, el menor tiempo de nado para cruzar el Canal de Inglaterra perteneció a una mujer durante muchos años. Tercero, el récord Guinness para el nado más largo en el océano sin paradas pertenece actualmente a una nadadora Australiana quien nado 196km en 38h y 33min.

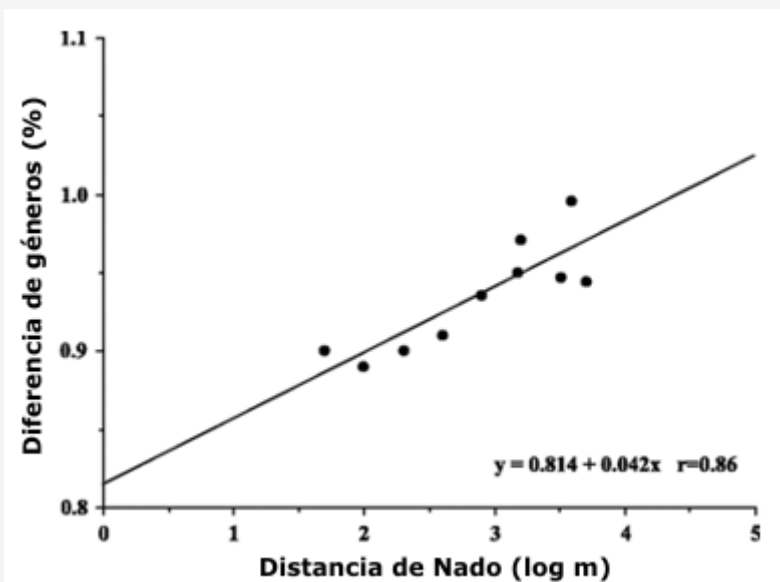


Figura 5. Relación entre las diferencias de género (velocidad de nado en mujeres/velocidad de nado en hombres) y la distancia de nado). (Modificado de la Ref 52).

Un punto final y más general acerca del tema de las diferencias sexuales en el rendimiento está relacionado a la posible influencia de la especificidad del deporte o la actividad física. Por ejemplo, una razón por la que las interacciones edad-sexo en el rendimiento pueden diferir en la natación y en la carrera es que durante muchos años a la mujer se le permitió realizar natación, pero se la desalentó para participar en otros deportes.

Factores implicados en la Declinación del Rendimiento durante el Ejercicio con el Envejecimiento

Con respecto al envejecimiento per se, no está enteramente claro porque parece haber una acelerada declinación en el rendimiento durante el ejercicio después de la edad de ~60-70 años. Esto fue observado tanto en eventos de carrera como en eventos de natación. Nuestros hallazgos, sin embargo, son consistentes con estudios previos llevados a cabo en el área de la función física y el envejecimiento. Por ejemplo, la velocidad de caminata elegida libremente declina relativamente poco hasta los ~60-70 años de edad, pero luego de esta edad es seguida por una disminución súbita (25). Además, la fuerza muscular valorada por medio de la capacidad de realizar levantamientos olímpicos, declina linealmente hasta los ~70 años de edad, luego de lo cual la tasa de declinación se acelera significativamente (34). Por lo tanto es tentativo especular que los cambios fundamentales en el proceso de envejecimiento biológico pueden ocurrir alrededor de la edad de 60-70 años, y producen una desmejora substancial del rendimiento físico, como lo sugiriera previamente Joyner (29). Alternativamente, esta también puede ser la edad a la cual se producen los cambios en el comportamiento (“mente-cuerpo”) (e.g., reducción en la motivación para entrenar a altos niveles). Con respecto a esto, la reducción en la actividad física espontánea con el envejecimiento es una característica de muchas especies animales diferentes, desde los insectos (50), roedores (27) hasta los humanos (13, 26, 42).

MECANISMOS FISIOLÓGICOS SUBYACENTES A LAS REDUCCIONES RELACIONADAS CON LA EDAD EN EL RENDIMIENTO DURANTE EJERCICIOS DE RESISTENCIA

La declinación en la PFC con el avance de la edad puede ser atribuida a reducciones conjuntas en los factores fisiológicos determinantes del rendimiento durante el trabajo-ejercicio. ¿Cuales son los mecanismos fisiológicos que podrían contribuir a la reducción relacionada con la edad en el rendimiento durante ejercicios de resistencia? En base a los datos recolectados principalmente en hombres jóvenes, hay tres factores principales que podrían estar implicados en la determinación del rendimiento de resistencia (9).

Capacidad Aeróbica Máxima

Generalmente se concuerda en que el $\text{VO}_2\text{máx.}$ es el principal factor que determina el rendimiento de resistencia debido a que establece el límite superior para la producción máxima de energía a través de las vías oxidativas (47). El rendimiento de resistencia y el $\text{VO}_2\text{máx.}$ están altamente correlacionados en poblaciones heterogéneas con respecto al $\text{VO}_2\text{máx.}$ (29, 53). Nosotros (14, 53, 60) y otros investigadores (9, 18, 29) hemos hallado una estrecha relación inversa entre el $\text{VO}_2\text{máx.}$ y la edad, en poblaciones de fondistas competitivos y de fondistas altamente entrenados de diferentes edades. Aunque estas observaciones son consistentes con el concepto acerca de que la reducción en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ contribuye a la reducción en el rendimiento de resistencia con el envejecimiento, la declinación en el rendimiento parece ser ligeramente menor que la caída en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ Esto podría explicarse por la menor tasa de declinación relacionada con la edad en otros factores determinantes del rendimiento durante el ejercicio: el umbral del lactato y la economía de ejercicio.

Umbral del Lactato

Un segundo factor es el umbral del lactato, definido como la intensidad de ejercicio a la cual las concentraciones de lactato comienzan a incrementarse significativamente por encima del nivel basal. Los pocos datos disponibles sugieren que la reducción en el umbral de lactato contribuye a la reducción relacionada con la edad en el rendimiento de resistencia (14, 18). El rendimiento de resistencia, valorado por medio del tiempo en una carrera de 5km, estuvo estrechamente asociado no solo con el $\text{VO}_2\text{máx.}$, sino también con la velocidad de ejercicio en el umbral del lactato en corredores varones de 21 a 69 años de edad (28). Datos más recientes de corredoras de fondo obtenidos en nuestro laboratorio (14) son consistentes con esta observación previa en hombres (Figura 6). Específicamente, nosotros hallamos que la reducción en el umbral del lactato parece contribuir a la declinación en el rendimiento de resistencia desde la adultez joven hasta la mediana edad, mientras que las reducciones en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ parecen contribuir más a la posterior declinación en el rendimiento, desde el inicio de la mediana edad hasta la parte tardía de la mediana edad (14).

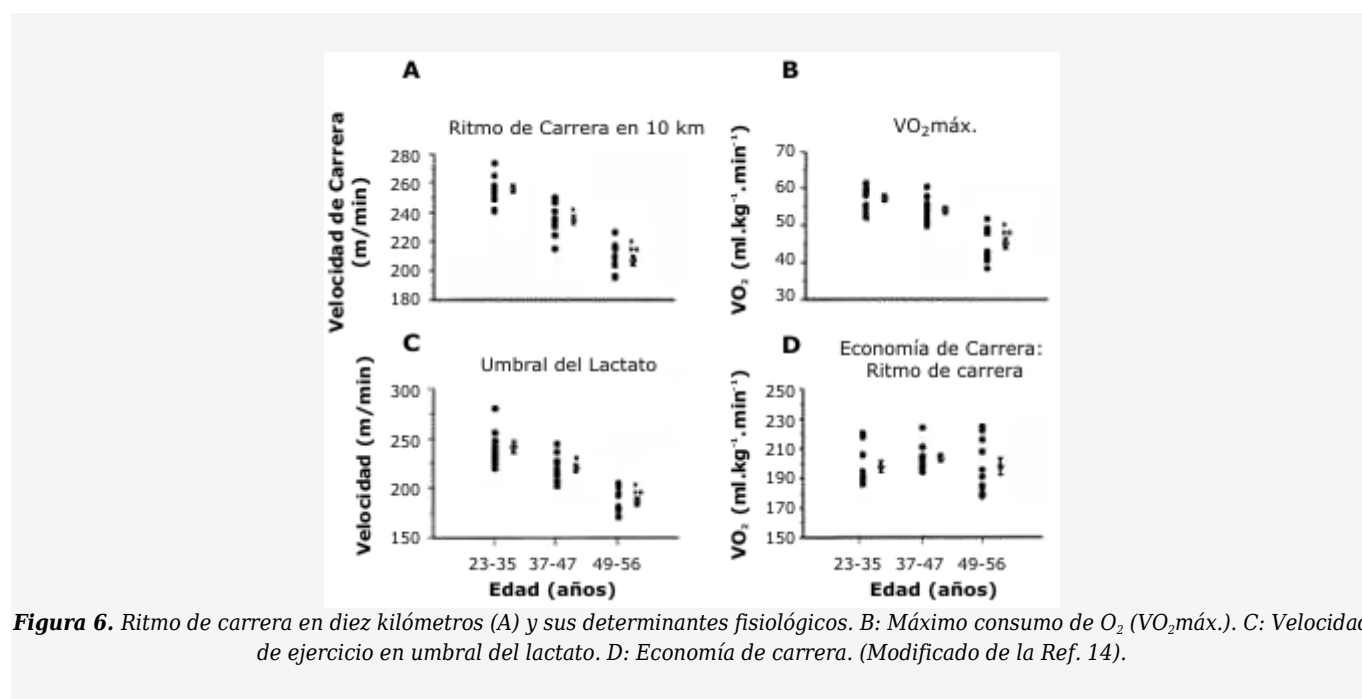


Figura 6. Ritmo de carrera en diez kilómetros (A) y sus determinantes fisiológicos. B: Máximo consumo de O_2 ($\text{VO}_2\text{máx.}$). C: Velocidad de ejercicio en umbral del lactato. D: Economía de carrera. (Modificado de la Ref. 14).

Tanto en hombres como en mujeres corredores entrenados, el umbral del lactato no parece cambiar con la edad cuando se lo expresa como un porcentaje del $\text{VO}_2\text{máx.}$ (2, 14). Por ejemplo, Allen et al. (2) no observaron diferencias en el porcentaje del $\text{VO}_2\text{máx.}$ asociado con el paso en una carrera de 10km en corredores jóvenes altamente entrenados (98%) y en corredores Masters (92%). Debido a esto, es posible que la contribución del umbral de lactato a la reducción relacionada con la edad en el rendimiento de resistencia este mediado, al menos en cierta proporción, por la reducción en el $\text{VO}_2\text{máx.}$

Economía de Ejercicio

Por último, se cree que la economía de ejercicio definida como el costo de oxígeno durante el ejercicio realizado a una determinada velocidad, es un importante factor que determina el rendimiento de resistencia (20, 36). Se sabe relativamente poco acerca de la influencia de la economía de ejercicio sobre la reducción relacionada con la edad en el rendimiento durante el ejercicio. En un estudio realizado con corredores varones de resistencia, no se hallaron diferencias

en la economía de carrera entre corredores jóvenes y ancianos (2). De manera similar, las observaciones en corredoras altamente entrenadas y competitivas de entre 35 y 70 años indicaron que no hay una relación significativa entre la economía de carrera y la edad (58). En un grupo de mujeres fondistas altamente entrenadas y competitivas de diferentes edades, nosotros hallamos que la economía de carrera explicaba poca de la varianza adicional en la reducción asociada con la edad en el rendimiento en una carrera de 10km luego de que se consideraran las diferencias en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ y en el umbral del lactato (14, Figura 6). Por lo tanto la limitada evidencia experimental en esta área sugiere que las reducciones en la economía de ejercicio no contribuyen significativamente a la reducción en el rendimiento de resistencia con el avance de la edad.

RESUMEN

En resumen, la progresiva reducción en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ parece ser el mecanismo fisiológico principal asociado con las declinaciones en el rendimiento en carreras de resistencia con el avance de la edad. Dada la importancia de las reducciones en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ en la mediación de las reducciones asociadas con la edad en el rendimiento durante el ejercicio y en la PFC, la mayor parte de nuestro trabajo sobre este tema se ha enfocado a las reducciones del $\text{VO}_2\text{máx.}$ con el envejecimiento. En particular, hemos estado interesados en las influencias potencialmente moduladoras del nivel de ejercicio aeróbico habitual sobre la tasa de declinación en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ con el envejecimiento.

NIVEL DE EJERCICIO HABITUAL Y CAPACIDAD AERÓBICA MÁXIMA

Antecedentes

La capacidad aeróbica máxima, medida por medio del $\text{VO}_2\text{máx.}$ es un indicador importante de la PFC. El profesor Sid Robinson (44) demostró en 1938 que el $\text{VO}_2\text{máx.}$ declina progresivamente con el avance de la edad, incluso en humanos adultos saludables. Esta reducción en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ tiene varias implicaciones clínicas y funcionales debido a que está asociada con el incremento del riesgo de mortalidad e incapacidad cardiovascular y por otras causas (8), así como también en la disminución del rendimiento físico, de las funciones cognitivas, de la calidad de vida y de la independencia (5, 57). Por esto, los factores del estilo de vida que pueden afectar la tasa de reducción en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ con el avance de la edad son de considerable interés público.

Con respecto a la influencia del nivel de ejercicio aeróbico habitual, las primeras investigaciones reportaron que la tasa de declinación en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ con la edad eran menores (e.g., solo del 50%) en atletas varones entrenados en resistencia que en hombres sedentarios (19, 22, 30). En base en gran parte a estas observaciones selectivas en hombres, se ha establecido y promovido ampliamente el concepto de que la tasa de declinación del $\text{VO}_2\text{máx.}$ con la edad está atenuada en adultos que realizan regularmente ejercicios de tipo aeróbico. Aparentemente en contraste con estas observaciones en hombres, nuestro grupo observó que las tasas reportadas de declinación en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ con la edad en mujeres físicamente activas era mayor que las generalmente observadas para mujeres sedentarias (4, 14, 58). En base a esta inconsistencia aparente, iniciamos una serie de esfuerzos experimentales con el propósito de determinar la relación entre el nivel habitual de ejercicio aeróbico y la tasa de declinación en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ con el envejecimiento.

Hallazgos Recientes en Mujeres Atletas Entrenadas en Resistencia

Como un paso inicial para investigar este tema, nuestro laboratorio (16) utilizó un enfoque meta-analítico en el cual se obtuvieron de la literatura publicada los valores medios de $\text{VO}_2\text{máx.}$ de grupos de mujeres en un determinado rango de edades. El total de 239 grupos de sujetos extraídos de 109 estudios que involucraba a 4884 sujetos fue separado en grupos de sujetos sedentarios, activos y entrenados en resistencia. Llamativamente en contraste con la creencia prevaleciente, los resultados de este análisis (16) respaldaron la idea opuesta, i.e., que la tasa absoluta ($\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}.\text{año}^{-1}$) de declinación en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ con el incremento en la edad era mayor en las mujeres entrenadas en resistencia, seguidas por las mujeres activas, siendo la tasa menor la de las mujeres sedentarias (Figura 7). Sin embargo, cuando expresamos los resultados como un porcentaje o en relación a los niveles medios a ~25 años de edad, la declinación en el $\text{VO}_2\text{máx.}$ fue similar en todos los grupos (16).

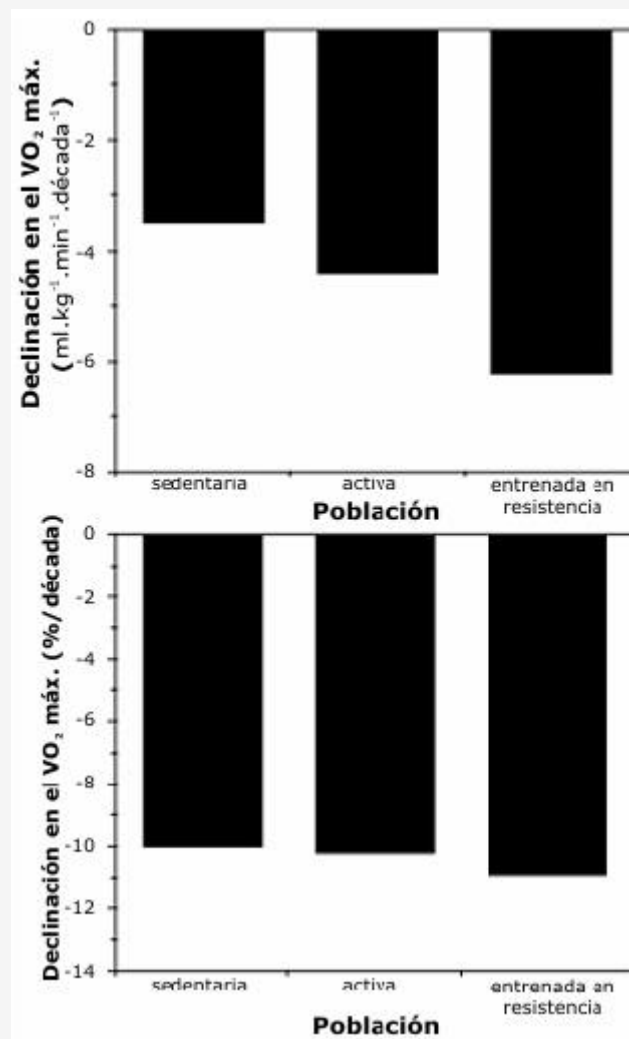


Figura 7. Tasas absolutas y relativas de declinación en el VO₂ máx. (A: en ml/kg/min/década; B: en %/década) en función de la edad en poblaciones sedentarias, activas y entrenadas en resistencia (de la Ref. 16).

Una limitación reconocida de un meta-análisis es la falta de control experimental, principalmente como resultado de la heterogeneidad de los métodos utilizados entre los estudios individuales que comprenden la base de datos. Por lo tanto, nosotros razonamos que se necesitaba de un estudio de laboratorio bien controlado para complementar los hallazgos de nuestro meta-análisis. Consecuentemente, nuestro grupo (53) estudió a un total de 156 mujeres no obesas saludables, quienes eran o sedentarias o altamente entrenadas en resistencia. Para establecer tan bien como fuera posible que el grupo de mujeres entrenadas en resistencia fuera homogéneo en todas las edades con respecto al grado relativo de “elite”, los sujetos fueron agrupados a través del rango entero de edades por medio de los tiempos ajustados a la edad con los récords mundiales en 10km. Además, para asegurar que los esfuerzos voluntarios máximos fueran similares, nos aseguramos que el índice de intercambio respiratorio y el índice de esfuerzo percibido en el VO₂ máx. no fueran diferentes entre los grupos de edades en ambos grupos. Consistentemente con nuestros hallazgos en el estudio meta-analítico, la tasa absoluta de declinación en el VO₂ máx. fue mayor en las mujeres entrenadas en resistencia en comparación con las mujeres sedentarias (53) (Figura 8). Nuevamente, la tasa (%) relativa de declinación en el VO₂ máx. fue similar en ambos grupos.

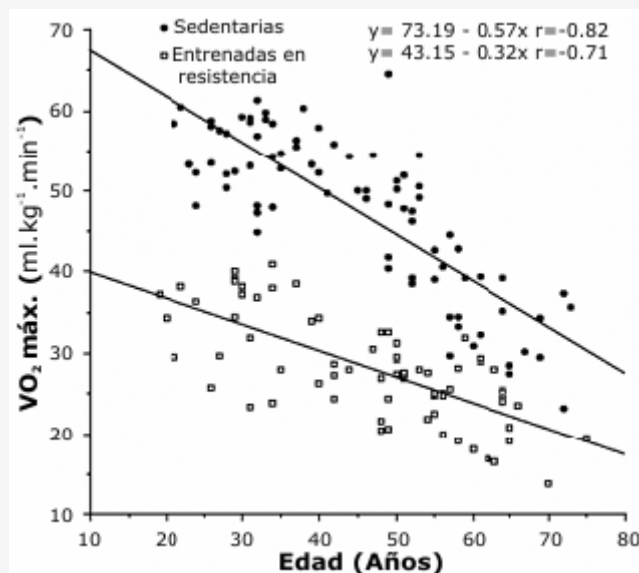


Figura 8. Relaciones entre el VO_2 máx. y la edad en mujeres entrenadas en resistencia y en mujeres sedentarias (de la Ref. 53).

Dadas las limitaciones inherentes de las comparaciones transversales, consideramos que estas observaciones deberían ser confirmadas con un estudio que tuviera un diseño longitudinal para de esta manera proporcionar un conocimiento más definitivo. Recientemente, nuestro grupo (13) estudio a 8 mujeres sedentarias y a 16 mujeres entrenadas en resistencia, antes y después de un período medio de seguimiento de 7 años. Durante el seguimiento, la masa corporal, la masa libre de grasa, el índice máximo de intercambio respiratorio y el índice máximo de esfuerzo percibido no fueron diferentes de los valores iniciales en ninguno de los grupos. Consistentemente con los resultados de nuestros estudios transversales, la tasa absoluta de declinación en el VO_2 máx. fue dos veces mayor en el grupo de mujeres entrenadas en resistencia en comparación con el grupo de mujeres sedentarias, sin que se observaran diferencias en las tasas relativas de declinación del VO_2 máx. (13) (Figura 9).

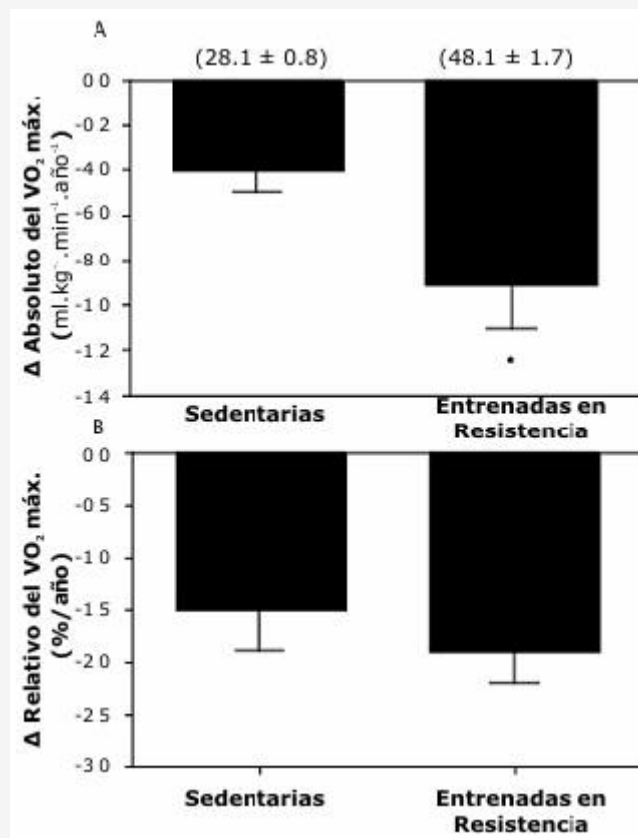


Figura 9. Tasas absolutas (A) y relativas (B) de declinación en el VO₂máx. con el incremento de la edad en el estudio longitudinal (de la Ref. 13). * $p < 0.05$ vs. los sujetos sedentarios; † $p < 0.05$ vs. los valores iniciales de los sujetos sedentarios.

Hallazgos Recientes en Atletas Varones Entrenados en Resistencia

En contraste con estos hallazgos en mujeres, un meta-análisis de la literatura en hombres no indicó diferencias en las tasas absolutas de declinación en el VO₂máx. entre hombres entrenados en resistencia y hombres sedentarios (60). Dada las limitaciones de un meta-análisis y los hallazgos contradictorios entre mujeres y hombres, recientemente completamos un estudio de laboratorio bien controlado con un diseño transversal para adquirir un mayor conocimiento acerca de esta posible inconsistencia. Nosotros demostramos que la tasa absoluta, pero no la relativa, de declinación en el VO₂máx. con la edad es mayor en hombres entrenados en resistencia en comparación con hombres sedentarios. Estos resultados son consistentes con recientes hallazgos de estudios longitudinales que han reportado que las tasas de declinación en el VO₂máx. con la edad son mayores en hombres entrenados en resistencia en comparación con las reportadas para hombres sedentarios (21, 42, 56). Interesantemente, se ha observado una tendencia similar en un estudio con animales en donde se ha reportado que la tasa absoluta de declinación en el VO₂máx. con la edad es mayor en ratas entrenadas que en ratas sedentarias (61).

RESUMEN

En conjunto, estos resultados indican que los hombres y mujeres entrenados en resistencia parecen mostrar mayores tasas absolutas de declinación en el VO₂máx. con el avance de la edad en comparación con adultos saludables sedentarios. Sin embargo, cuando los valores se expresan como porcentaje de reducción a partir de los valores de la juventud, las tasas de declinación en el VO₂máx. con la edad son similares entre los humanos entrenados en resistencia y los humanos sedentarios.

MECANISMOS SUBYACENTES A LA MAYOR DECLINACIÓN ABSOLUTA EN EL VO₂MÁX. CON LA EDAD EN ADULTOS ENTRENADOS EN RESISTENCIA

El concepto predominante de una menor tasa de declinación en la capacidad aeróbica máxima con la edad en adultos entrenados en resistencia es lógico, en base a nuestro entendimiento de las adaptaciones fisiológicas al ejercicio aeróbico regular, y es ciertamente atractivo desde un punto de vista de la prevención en la gerontología (6). Sin embargo, se pueden hacer varios argumentos para hipotetizar mayores tasas de declinación en el VO₂máx. con la edad en adultos entrenados en resistencia.

“Efecto del nivel inicial”

El primer argumento implica al efecto del nivel inicial. Esto es, los individuos con mayores niveles de VO₂ máx. como adultos jóvenes demuestran una mayor tasa de declinación con el avance de la edad. Este argumento está respaldado por la observación de que, cuando se quita el efecto del nivel inicial expresando los datos como cambios relativos (porcentajes), las tasas de declinación en el VO₂máx. con el envejecimiento son similares en grupos de sujetos entrenados en resistencia que en grupos de sujetos sedentarios (13, 16, 41, 53). Una analogía es aparente en la relación entre los valores iniciales y los cambios en el VO₂máx. con la edad cuando se comparan hombres con mujeres. Los hombres tienen mayores valores absolutos de VO₂máx. cuando son adultos jóvenes en comparación con las mujeres, pero muestran una mayor tasa absoluta de declinación en el VO₂máx. con el envejecimiento en comparación con las mujeres (26). Sin embargo, cuando las reducciones en el VO₂máx. se expresan como porcentaje de los valores entre la juventud y la adultez, las diferencias relacionadas con el sexo dejan de ser evidentes (26). De esta manera, el efecto del nivel inicial que surge a partir de que los sujetos cuando son jóvenes poseen niveles absolutos marcadamente mayores en el VO₂máx., puede contribuir a las mayores tasas absolutas de reducción en el VO₂máx. con el envejecimiento en adultos entrenados en resistencia en comparación con sujetos sedentarios.

Declinación en los Estímulos de Entrenamiento

Un segundo argumento implica la declinación en la intensidad y en el volumen de ejercicio aeróbico habitual con el avance de la edad, i.e., el “estímulo de ejercicio”. Debido a que los adultos sedentarios, por definición no realizan regularmente ejercicios aeróbicos, la magnitud de la declinación en la actividad física con la edad y, por lo tanto, la reducción absoluta en los estímulos de ejercicios, son mucho mayores en aquellos individuos que se ejercitan regularmente.

En efecto, los resultados de nuestras investigaciones y de otros respaldan esta idea. En el primer meta-análisis, nuestro grupo (16) reportó una declinación progresiva relacionada con la edad en el volumen de entrenamiento entre los grupos disponibles de mujeres entrenadas en resistencia. Sin embargo, muchos estudios no reportaron el kilometraje de entrenamiento, y por lo tanto la limitada base de datos no nos permitió realizar conclusiones definitivas. En el subsiguiente estudio transversal de laboratorio, el kilometraje semanal, la frecuencia y la velocidad de entrenamiento declinaron significativamente con la edad, y estas declinaciones estuvieron asociadas con las correspondientes declinaciones en el VO₂máx. (53). Sin embargo, la fuerte evidencia de la influencia de la declinación en el estímulo de entrenamiento proviene de los resultados de un reciente estudio longitudinal llevado a cabo en nuestro laboratorio (13). Específicamente, hallamos que la mayor tasa de declinación en el VO₂máx. en el período de seguimiento de 7 años en la muestra global de mujeres entrenadas en resistencia en comparación con las mujeres sedentarias, estuvo asociada con reducciones significativas en el volumen de entrenamiento en algunas de las mujeres entrenadas en resistencia. Las mujeres entrenadas en resistencia que mantuvieron su volumen de entrenamiento a lo largo del período de seguimiento mostraron reducciones en el VO₂máx. similares a aquellas observadas en mujeres saludables sedentarias (Figura 10).

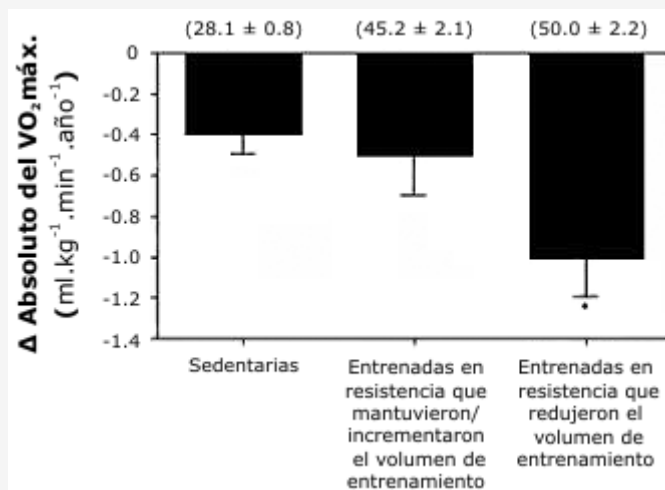


Figura 10. Tasas absolutas de declinación en el VO₂máx. en mujeres entrenadas en resistencia que redujeron, mantuvieron y/o incrementaron el volumen de entrenamiento inicial. (de la Ref. 13). • $p < 0.05$ vs. los otros dos grupos.

Estos hallazgos concuerdan con los estudios longitudinales en hombres, los cuales mostraron una asociación significativa entre las expresiones de estímulos de entrenamiento de resistencia y la tasa de declinación en el VO₂máx. con la edad (42, 56). En conjunto, estos resultados sugieren que la mayor tasa absoluta de declinación en el VO₂máx. con el envejecimiento en adultos entrenados en resistencia puede estar mediada, al menos en parte, por una marcada declinación relacionada con la edad en su nivel de entrenamiento.

Cambios en el Peso Corporal

Debido a que el VO₂máx. se expresa tradicionalmente en unidades corregidas por las diferencias en el peso corporal, es posible que los grandes incrementos en el peso corporal con la edad en los grupos entrenados en resistencia contribuyan a las mayores tasas de declinación en el VO₂máx. Sin embargo, este no parece ser el caso. La masa corporal y la masa libre de grasa se mantuvieron a través de las edades en los adultos entrenados en resistencia, mientras que los adultos sedentarios mostraron un incremento significativo en la grasa y en la masa corporal total a través de la edad (53). El incremento en la grasa y en la masa corporal total relacionada con la edad en los adultos sedentarios debería actuar incrementando su tasa de reducción en el VO₂máx. (cuando este se expresa en ml.kg⁻¹.min⁻¹) en comparación con los adultos entrenados en resistencia.

Determinantes Fisiológicos

En base a la ecuación de Fick, el VO₂máx. es el producto de la frecuencia cardíaca máxima, el volumen sistólico máximo y la máxima diferencia arterio-venosa de O₂ (46). Se ha hipotetizado que la declinación en el VO₂máx. con el envejecimiento en adultos entrenados y desentrenados puede ser influenciada por la correspondiente reducción en la frecuencia cardíaca máxima (19, 22). Sin embargo, nuestro laboratorio ha demostrado repetidamente (13, 16, 41, 53, 60) que no existe relación entre las reducciones en la frecuencia cardíaca máxima y el nivel de ejercicio habitual. Esto indica que otros factores, tales como la declinación en el volumen sistólico máximo o en la capacidad oxidativa de los músculos, son los responsables de las diferencias en las tasas absolutas de declinación en el VO₂máx. observadas en sujetos que se ejercitan regularmente en comparación con los adultos sedentarios.

Los cálculos en base a los datos de Ogawa et al. (37) indican que sus mujeres entrenadas en resistencia mostraron una tasa absoluta de declinación del VO₂máx. un ~50% mayor en comparación con las mujeres sedentarias. Esto estuvo asociado con una tasa de declinación ~60% mayor en el volumen sistólico máximo en las mujeres entrenadas en resistencia vs. las mujeres sedentarias (37). En contraste, las diferencias en la máxima diferencia arterio-venosa de O₂ relacionadas con la edad fueron similares en los grupos de entrenadas en resistencia y sedentarias. Una tasa similarmente grande de declinación en el volumen sistólico máximo fue también observada en los grupos de hombres entrenados en resistencia que estos investigadores estudiaron (37). Estos resultados son consistentes con la hipótesis de que la mayor tasa absoluta de declinación en el VO₂máx. en adultos entrenados en resistencia es mediada por una mayor tasa de declinación en el volumen sistólico máximo, y por lo tanto en el gasto cardíaco máximo. Las ideas mecanísticas definitivas acerca este tema van a tener que obtenerse a partir de la realización de estudios longitudinales.

PERSPECTIVAS

Es ampliamente conocido que la situación demográfica de la edad en los Estados Unidos y en otras sociedades industrializadas está cambiando drásticamente. El porcentaje de adultos de 65 años y mayores continuará incrementándose en el futuro inmediato. Los ancianos tienen las mayores tasas de morbilidad, incapacidad funcional, pérdida de independencia y mortalidad. Per cápita, también utilizan por lejos el mayor porcentaje de las fuentes de cuidados de la salud. Por esto, es crítico que identifiquemos estrategias efectivas para extender la salud, la capacidad funcional y la independencia de los ancianos hasta una edad lo más cercana posible a la de la muerte natural, tal como lo mencionara elegantemente el Profesor Fries (17) cuando hizo énfasis en la comprensión de la morbilidad. Rowe y Kahn (45) han hecho contribuciones similarmente importantes a esta conversación por medio de estimular las discusiones que promovieran la idea de “un envejecimiento exitoso”. Nosotros creemos que nuestro trabajo y el de otros investigadores, presentados aquí, tienen varias implicancias importantes con respecto a nuestra capacidad para el mantenimiento de la función física con el avance de la edad y algunos factores fisiológicos clave que determinan nuestra habilidad para hacerlo.

Primero, hemos hallado que, aunque el rendimiento dinámico de los grandes grupos musculares declina modestamente luego de los ~35-40 años de edad, el rendimiento se mantiene relativamente bien hasta los ~60-70 años de edad en promedio (11, 12, 54, 55). Esto sugiere que, desde una perspectiva puramente fisiológica, la mayor parte de los adultos es capaz de sostener la PFC hasta esta edad. Cuando se observa una pérdida significativa de la función física antes de esta edad, es posible que pueda atribuirse a los efectos de enfermedades, estilos de vida negativos (e.g., estilo de vida extremadamente sedentario, una marcada ganancia de peso, fumar) y/o una genética desfavorable. En contraste, después de los 60-70 años de edad, el rendimiento durante el ejercicio declina exponencialmente (11, 12, 54, 55). Estas observaciones respaldan la hipótesis acerca de que las reducciones significativas en la función física durante y después de la séptima década de vida son mediadas, al menos en parte, por las reducciones en las capacidades fisiológicas intrínsecas (reserva) para realizar dichas tareas. La comorbilidad y otros factores por supuesto pueden acelerar la pérdida de PFC durante estos años.

Segundo, las reducciones asociadas con la edad en el rendimiento generalmente parecen ser mayores en las mujeres (11, 54, 55). Nuestros datos indican que dichas diferencias relacionadas con el sexo pueden ser confirmadas para ciertos tipos de actividades dinámicas llevadas a cabo con grupos musculares grandes (e.g., carreras de distancia, natación de velocidad), mientras que las reducciones en el rendimiento con el envejecimiento parecen ser similares en hombres y mujeres en otras tareas (rendimiento en la natación de fondo) (12). Estas observaciones respaldan el concepto de que la mayor declinación en la función física con la edad en las mujeres, cuando esta es observada, puede tener una base fisiológica subyacente, dependiendo de la tarea involucrada. Por otra parte, las reducciones excesivas en la capacidad funcional en mujeres para ciertos tipos de actividades puede estar ligada a influencias no biológicas (e.g., factores sociológicos que actúan para reducir el nivel de actividad física habitual).

Un tercer concepto que es nuevo y que es respaldado por nuestros hallazgos es la importancia de la capacidad aeróbica máxima en la determinación de los cambios en el rendimiento de resistencia de grandes músculos con el envejecimiento. En efecto, los resultados de investigaciones tanto con mujeres (14) como con hombres (2), indican que incluso la aparente contribución de la reducción del llamado “umbral del lactato” a las declinaciones en el rendimiento durante ejercicios de resistencia con el envejecimiento puede ser secundaria a las reducciones en el VO_2 máx. Estos hallazgos enfatizan la necesidad de identificar y aplicar estrategias para mantener de manera óptima la capacidad aeróbica máxima con el avance de la edad para preservar la PFC. Esto también plantea el interrogante de si el ejercicio aeróbico de alta intensidad, el cual se sabe que proporciona un estímulo más efectivo para el mantenimiento o el aumento del VO_2 máx. (23, 48), debería ser considerado en el desarrollo de programas de ejercicio óptimos para ancianos. Esto representaría un cambio en el paradigma de las actuales recomendaciones que enfatizan la participación diaria en actividades aeróbicas de baja a moderada intensidad para adultos de edad mediana y avanzada (1, 38).

Un cuarto concepto nuevo que surgió de nuestro trabajo es el hallazgo de que los atletas de resistencia no demuestran reducciones absolutas atenuadas en el VO_2 máx. con el envejecimiento en comparación con los sujetos sedentarios, sino que en cambio, al menos como un grupo, mostraron justamente lo opuesto (13, 16, 41, 53). Sin embargo, quizás la observación más importante realizada en esta serie de recientes estudios es la importancia fundamental de mantener los niveles habituales de ejercicio (“estímulo de entrenamiento”) con respecto a la declinación asociada con la edad del VO_2 máx. en adultos entrenados en resistencia. Aquellos que son capaces de mantener un entrenamiento vigoroso y frecuente presentaron reducciones en la capacidad aeróbica máxima similares a las de aquellos adultos sedentarios, mientras que aquellos que sufrieron grandes reducciones en la intensidad y en el volumen de entrenamiento mostraron declinaciones exacerbadas en el VO_2 máx. (13). Dicho de otra forma, aparentemente la tasa de reducción en la capacidad aeróbica máxima y por lo tanto en la PFC con el envejecimiento no es inherentemente diferente entre las poblaciones o los grupos (e.g., adultos sedentarios vs. atletas entrenados en resistencia). En cambio, al menos en adultos saludables, la tasa de

declinación en el VO₂máx. entre los sujetos, con el avance de la edad, estará ampliamente determinada por la correspondiente reducción en el nivel de ejercicio habitual. Aquellos que muestren las mayores reducciones en el volumen y/o en la intensidad de ejercicio serán los que muestren las mayores reducciones asociadas con la edad en la capacidad aeróbica máxima y en la PFC.

Finalmente es importante enfatizar que, aunque la tasa de declinación del VO₂máx. con la edad es en promedio mayor en adultos entrenados en resistencia en comparación con los adultos sedentarios, los primeros tienen mayores niveles absolutos de capacidad aeróbica máxima y de PFC en comparación con cualquier adulto sedentario. De esta manera aquellos que realizan ejercicios en forma regular son capaces de realizar tareas físicas que no pueden ser realizadas por los sujetos sedentarios, al menos con el mismo grado de vigor o esfuerzo (59). Además, los adultos de edad mediana y avanzada que realizan ejercicios regulares de resistencia aeróbica muestran una mucho menor prevalencia de muchas enfermedades crónicas degenerativas, incluyendo alteraciones cardiovasculares, y ciertos tipos de cáncer, en comparación con los adultos del mismo sexo y de edad similar (1, 43). Como resultado, los adultos físicamente activos tienen un menor riesgo de mortalidad prematura y de discapacidad funcional en comparación con los adultos sedentarios (8). De acuerdo con esto, a pesar del hecho de que la tasa de declinación en el VO₂máx. con el envejecimiento es mayor en los adultos entrenados en resistencia, quienes experimentan reducciones significativas en su entrenamiento físico, en comparación con el adulto promedio saludable, en general, los individuos que son físicamente activos disfrutan de una mayor PFC y un riesgo reducido de padecimiento de enfermedades crónicas, respaldando las actuales recomendaciones acerca de la importancia del ejercicio en el mantenimiento de la salud general y de la calidad de vida (38).

Dirección para el Pedido de Reimpresiones y otra Correspondencia

H. Tanaka, Dept. of Kinesiology and Health Education, Univ. of Texas at Austin, Austin, TX 78712 (correo electrónico: htanaka@mail.utexas.edu).

REFERENCIAS

1. ACSM Position Stand (1998). Exercise and physical activity for older adults. *Med Sci Sports Exerc* 30: 992-1008
2. Allen WK, Seals DR, Hurley BF, Ehsani AA, and Hagberg JM (1985). Lactate threshold and distance-running performance in young and older endurance athletes. *J Appl Physiol* 58: 1281-1284
3. American Heart Association (2001). Heart and Stroke: Statistical Update. Dallas, TX: AHA
4. Astrand I, Astrand PO, Hallback I, and Kilbom A (1973). Reduction in maximal oxygen uptake with age. *J Appl Physiol* 35: 649-654
5. Bassey EJ, Fiatarone MA, O'Neill EF, Kelly M, Evans WJ, and Lipsitz LA (1992). Leg extensor power and functional performance in very old men and women. *Clin Sci* 82: 321-327
6. Bierman EL and Hazzard WR (1994). Preventive gerontology: strategies for attenuation of the chronic diseases of aging. In: *Principles of Geriatric Medicine and Gerontology (3rd ed.)*, edited by Hazzard WR. New York: McGraw-Hill, p. 187-191
7. Binder EF, Birge SJ, Spina R, Ehsani AA, Brown M, Sinacore DR, and Kohrt WM (1999). Peak aerobic power is an important component of physical performance in older women. *J Gerontol* 54A: M353-M356
8. Blair SN, Kohl HW, Barlow CE, Paffenbarger RS, Gibbons LW, and Macera CA (1995). Changes in physical fitness and all-cause mortality. *JAMA* 273: 1093-1098
9. Costill DL (1986). Inside Running: Basics of Sports Physiology. Indianapolis, IN: Benchmark
10. Craig AB and Pendergast DR (1979). Relationship of stroke rate, distance per stroke, and variation in competitive swimming. *Med Sci Sports Exerc* 11: 278-283
11. Dempsey JA and Seals DR (1995). Aging, exercise, and cardiopulmonary function. In: *Persp in Ex Science and Sports Med. Exercise in Older Adults*, edited Lamb DR, Gisolfi CV, and Nadel E. Carmel, IN: Cooper, vol. 8, p. 237-304
12. Donato AJ, Tench K, Glueck DH, Seals DR, Eskurza I, and Tanaka H (2003). Declines in physiological functional capacity with age: a longitudinal study in peak swimming performance. *J Appl Physiol* 94: 764-769
13. Eskurza I, Donato AJ, Moreau KL, Seals DR, and Tanaka H (2002). Changes in maximal aerobic capacity with age in endurance-trained women: 7-year follow-up. *J Appl Physiol* 92: 2303-2308
14. Evans SL, Davy KP, Stevenson ET, and Seals DR (1995). Physiological determinants of 10-km performance in highly trained female runners of different ages. *J Appl Physiol* 78: 1931-1941
15. Evans WJ (1995). Effects of exercise on body composition and functional capacity of the elderly. *J Gerontol* 50A: 147-150
16. FitzGerald MD, Tanaka H, Tran ZV, and Seals DR (1997). Age-related decline in maximal aerobic capacity in regularly exercising vs. sedentary females: a meta-analysis. *J Appl Physiol* 83: 160-165
17. Fries JF (1980). Aging, natural death, and the compression of morbidity. *N Engl J Med* 303: 130-135
18. Fuchi T, Iwaoka K, Higuchi M, and Kobayashi S (1989). Cardiovascular changes associated with decreased aerobic capacity and aging in long-distance runners. *Eur J Appl Physiol* 58: 884-889
19. Hagberg JM (1987). Effect of training on the decline of O₂max with aging. *Federation Proc* 46: 1830-1833
20. Hagberg JM and Coyle EF (1984). Physiologic comparison of competitive racewalking and running. *Int J Sports Med* 5: 74-77

21. Hagerman FC, Fielding RA, Fiatarone MA, Gault JA, Kirkendall DT, Ragg KE, and Evans WJ (1996). A 20-yr longitudinal study of Olympic oarsmen. *Med Sci Sports Exerc* 28: 1150-1156
22. Heath GW, Hagberg JM, Ehsani AA, and Holloszy JO (1981). A physiological comparison of young and older endurance athletes. *J Appl Physiol* 51: 634-640
23. Hickson RC, Bomze HA, and Holloszy JO (1977). Linear increase in aerobic power induced by a strenuous program of endurance exercise. *J Appl Physiol* 42: 372-376
24. Hill AV (1925). The physiological basis of athletic records. *Sci Monthly* 21: 409-428
25. Himann JE, Cunningham DA, Rechnitzer PA, and Paterson DH (1988). Age-related changes in speed of walking. *Med Sci Sports Exerc* 20: 161-166
26. Holloszy JO and Kohrt WM (1995). Exercise. In: Handbook of Physiology. *Aging. Bethesda, MD: Am. Physiol. Soc., sect. 11, chap. 24, p. 633-666*
27. Holloszy JO, Smith EK, Vining M, and Adams S (1985). Effect of voluntary exercise on longevity of rats. *J Appl Physiol* 59: 826-831
28. Iwaoka K, Fuchi T, Higuchi M, and Kobayashi S (1988). Blood lactate accumulation during exercise in older endurance runners. *Int J Sports Med* 9: 253-256
29. Joyner MJ (1993). Physiological limiting factors and distance running: influence of gender and age on record performances. In: *Exercise and Sport Science Reviews, edited by Holloszy JO. Baltimore, MD: Williams & Wilkins, vol. 21, p. 103-133*
30. Kasch FW, Boyer JL, Camp SPV, Verity LS, and Wallace JP (1990). The effect of physical activity and inactivity on aerobic power in older men (a longitudinal study). *Phys Sportsmed* 18: 73-83
31. Lavoie JM and Montpetit RR (1986). Applied physiology of swimming. *Sports Med* 3: 165-189
32. Levy CM, Kolin E, and Berson BL (1986). Cross training: risk or benefit? An evaluation of injuries in four athlete populations. *Sports Med Clin* 3: 1-8
33. Levy CM, Kolin E, and Berson BL (1986). The effect of cross training on injury incidence, duration, and severity (part 2). *Sports Med Clin* 3: 1-8
34. Meltzer DE (1994). Age dependence of Olympic weightlifting ability. *Med Sci Sports Exerc* 26: 1053-1067
35. Moore DH (1975). A study of age group track and field records to relate age and running speed. *Nature* 253: 264-265
36. Morgan DW and Craib M (1992). Physiological aspects of running economy. *Med Sci Sports Exerc* 24: 456-461
37. Ogawa T, Spina RJ, Martin WH, Kohrt WM, Schechtman KB, Holloszy JO, and Ehsani AA (1992). Effects of aging, sex, and physical training on cardiovascular responses to exercise. *Circulation* 86: 494-503
38. Pate, Pratt, Blair, Haskell, Macera, Bouchard, Buchner, Ettinger, Heath, King, Kriska, Leon, Marcus, Morris, Paffenburger, Patrick, Pollock, Rippe, Sallis, and Wilmore (1995). Physical activity and public health: a recommendation from the Centers for Disease Control and Prevention and the American College of Sports Medicine. *JAMA* 273: 402-407
39. Pendergast DR, Prampero PED, Craig AB, Wilson DR, and Rennie DW (1977). Quantitative analysis of the front crawl in men and women. *J Appl Physiol* 43: 475-479
40. Phillips SK, Rook KM, Siddle NC, Bruce SA, and Woledge RC (1993). Muscle weakness in women occurs at an earlier age than in men, but strength is preserved by hormone replacement therapy. *Clin Sci* 84: 95-98
41. Pimentel AE, Gentile CL, Tanaka H, Seals DR, and Gates PE (2003). Greater rate of decline in maximal aerobic capacity with age in endurance-trained vs sedentary men. *J Appl Physiol* 94: 2406-2413
42. Pollock ML, Mengelkoch LJ, Graves JE, Lowenthal DT, Limacher MC, Foster C, and Wilmore JH (1997). Twenty-year follow-up of aerobic power and body composition of older track athletes. *J Appl Physiol* 82: 1508-1516
43. Powell KE, Thompson PD, Caspersen CJ, and Kendrick JS (1987). Physical activity and the incidence of coronary heart disease. *Ann Rev Public Health* 8: 253-287
44. Robinson S (1938). Experimental studies of physical fitness in relation to age. *Arbeitsphysiol* 10: 251-323
45. Rowe JW and Kahn RL (1987). Human aging: usual and successful. *Science* 237: 143-149
46. Rowell LB (1986). Human Circulation: Regulation During Physical Stress. *New York: Oxford Univ. Press*
47. Saltin B and Astrand PO (1967). Maximal oxygen uptake in athletes. *J Appl Physiol* 23: 353-358
48. Seals DR, Hagberg JM, Hurley BF, Ehsani AA, and Holloszy JO (1984). Endurance training in older men and women. I. *Cardiovascular responses to exercise. J Appl Physiol* 57: 1024-1029
49. Skelton DA, Greig CA, Davies JM, and Young A (1994). Strength, power and related functional ability of healthy people aged 65-89 years. *Age Ageing* 23: 371-377
50. Sohal RS and Buchan PB (1981). Relationship between physical activity and life span in the adult housefly, *Musca domestica*. *Exp Gerontol* 16: 157-162
51. Stevenson ET, Davy KP, and Seals DR (1994). Maximal aerobic capacity and total blood volume in highly trained middle-aged and older female endurance athletes. *J Appl Physiol* 77: 1691-1696
52. Tanaka H (2002). The battle of the sexes in sports. *Lancet* 360: 92
53. Tanaka H, DeSouza CA, Jones PP, Stevenson ET, Davy KP, and Seals DR (1997). Greater rate of decline in maximal aerobic capacity with age in physically active vs. sedentary healthy women. *J Appl Physiol* 83: 1947-1953
54. Tanaka H and Higuchi M (1998). Age, exercise performance, and physiological functional capacities. *Adv Exerc Sports Physiol* 4: 51-56
55. Tanaka H and Seals DR (1997). Age and gender interactions in physiological functional capacity: insight from swimming performance. *J Appl Physiol* 82: 846-851
56. Trappe SW, Costill DL, Vukovich MD, Jones J, and Melham T (1996). Aging among elite distance runners: a 22-yr longitudinal study. *J Appl Physiol* 80: 285-290
57. Van Boxtel MPJ, Paas FGW, Houx PJ, Adam JJ, Teeken JC, and Jolles J (1997). Aerobic capacity and cognitive performance in a cross-sectional aging study. *Med Sci Sports Exerc* 29: 1357-1365
58. Wells CL, Boorman MA, and Riggs DM (1992). Effect of age and menopausal status on cardiorespiratory fitness in masters women runners. *Med Sci Sports Exerc* 24: 1147-1154

59. WHO Study Group (1993). Aging and Working Capacity. *Geneva, Switzerland: World Health Organization*
60. Wilson TM and Tanaka H (2000). Meta-analysis of the age-associated decline in maximal aerobic capacity in men: relation to training status. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 278: H829-H834
61. Zimmerman SD, McCormick RJ, Vadlamudi RK, and Thomas DP (1993). Age and training alter collagen characteristics in fast- and slow-twitch rat limb muscle. *J Appl Physiol* 75: 1670-1674

Cita Original

Tanaka Hirofumi and Douglas R. Seals Invited Review: Dynamic exercise performance in Masters athletes: insight into the effects of primary human aging on physiological functional capacity. *J Appl Physiol*; 95: 2152-2162, 2003.