

Monograph

Comparación entre la Ventilación y la Frecuencia Cardíaca como Indicador del Consumo de Oxígeno durante Ejercicios de Diferentes Intensidades

Steven Gastinger¹, Nicolás Guillaume¹, Arlette Gratas-Delamarche¹, Jacques Prioux² y Anthony Sorel¹

¹M2S Laboratoiy, Physiology and Biomechanics, UFR APS University of Rennes 2, 35044 Rennes Cedex, France.

²ENS - Cachan, Antenne de Bretagne, Campus de Ker-Lann, 35170 Braz Cedex, France.

RESUMEN

El propósito de este estudio es comparar la relación entre la ventilación (V_E) y el consumo de oxígeno (VO_2) [$VO_2=f(V_E)$] y entre la frecuencia cardíaca (HR) y el VO_2 [$VO_2=f(HR)$]. Cada uno de los participantes realizó tres tipos de actividades de diferentes intensidades (caminata sin carga, caminata con carga y trabajo intermitente). Se midieron el VO_2 , la V_E , y la HR en forma continua mediante la utilización de calorimetría indirecta y de un electrocardiograma. Se calcularon las regresiones lineales y los coeficientes de determinación (r^2) para comparar la relación $VO_2 = f(V_E)$ y $VO_2 = f(HR)$ para dos reagrupamientos diferentes: por la duración de la sesión ($r^2_{sesión}$) y por sujeto (r^2_{sujeto}). Los resultados mostraron que las $r^2_{sesión}$ de la relación $VO_2 = f(V_E)$ fueron significativamente mayores que las de la relación $VO_2 = f(HR)$ para las actividades en estado estable (caminata con o sin carga durante 3 o 6 minutos, $p < 0.01$) y para las actividades en estado no estable de consumo de oxígeno (caminata con o sin carga durante 1 minuto, $p < 0.01$ y trabajo intermitente, $p < 0.05$). La V_E muestra una correlación más clara con el VO_2 que con la HR. Este es un método prometedor con el fin de desarrollar un nuevo método para estimar el gasto energético.

Palabras Clave: actividades físicas, intensidades leves a moderadas, actividades en estado estable, actividades en estado no estable

INTRODUCCION

La actividad física representa la parte más variable del gasto energético (EE) del ser humano (Ravussin y Gautier, 2002). La medición precisa del EE asociada con la actividad física aún sigue siendo un desafío. Esta dificultad aumenta al observar actividades leves o intermitentes. Se han explorado muchos parámetros para estimar el EE durante las actividades físicas de diferentes intensidades. La técnica de agua doblemente marcada (DLW) y la calorimetría indirecta, consideradas como las mediciones de referencia (*Gold Standard*) del EE (Westterterp, 1999), son ambas limitadas en su

evaluación del EE fuera del laboratorio. La calorimetría indirecta no puede evaluar con facilidad a los sujetos durante sus actividades cotidianas fuera del laboratorio, mientras que la técnica de DLW no proporciona información sobre el patrón, la frecuencia o la intensidad de la actividad física. En la actualidad han surgido dispositivos portátiles y de menor costo que hacen posible la estimación del EE en organismos independientes. Los sensores electrónicos de movimiento intentan analizar los movimientos del cuerpo humano para estimar "conteos" y el TEE (gasto energético total) (Bouchard y Trudeau, 2008; Corder et al., 2007; Nilsson et al., 2008; Plasqui y Westerterp, 2007). Desafortunadamente, estos dispositivos no son capaces de detectar los movimientos de los brazos o el trabajo externo realizado al levantar o empujar objetos, lo que puede representar un componente importante de de las actividades cotidianas (Bassett et al., 2000). Nuevos dispositivos portátiles pueden acoplar parámetros biomecánicos y fisiológicos. El Actiheart® y el SensorWear Armband® acoplaron las mediciones de los parámetros fisiológicos (frecuencia cardíaca y flujo del calor respectivamente) con un sistema de acelerómetro. Estos dispositivos proporcionan mejores resultados en comparación con los sensores electrónicos de movimiento clásicos, pero aún se observan diferencias en comparación con los métodos de referencia (et al., 2005; Corder et al., 2005; Fruin y Rankin, 2004; King et al., 2004).

A fin de considerar el EE durante la realización de actividades cotidianas fuera del laboratorio, uno de los enfoques más actuales en el campo de la fisiología consiste en la utilización de la relación entre la frecuencia cardíaca (HR) y el consumo de oxígeno (VO_2) ($VO_2 = (HR \times V_{es}) \times (CaO_2 - CvO_2)$), donde V_{es} representa el volumen de eyección sistólica ($mL \cdot min^{-1}$), CaO_2 es la cantidad de oxígeno que lleva la sangre arterial ($mL \cdot 100 mL^{-1}$), y CvO_2 es la cantidad de oxígeno que lleva la sangre de las venas ($mL \cdot 100 mL^{-1}$). Este método ha sido extensamente estudiado (Garet et al., 2005; Hiilloskorpi et al., 2003; Kurpad et al., 2006; Livingstone et al., 2000; Rayson et al., 1995) y demostró estar adaptado para estimar el EE: el *cardiotacómetro* es un dispositivo que puede transportarse con facilidad y no representa ningún carácter invasivo. Sin embargo, el uso de la HR para estimar el EE puede ser criticado debido a la variabilidad de este parámetro durante las actividades de baja y muy alta intensidad (Achten y Jeukendrup, 2003; Haskell et al., 1993). De la misma manera, diversos estudios (Davidson et al., 1997; Melanson y Freedson, 1996; Montoye et al., 1996) han demostrado que el estrés emocional, la alta temperatura ambiente, los altos niveles de humedad, la deshidratación, la posición del cuerpo o la enfermedad pueden implicar variaciones en la HR sin que varíe el VO_2 . Todos estos límites dan cuenta de las dificultades de medir el EE en forma precisa a partir de las mediciones de la HR, particularmente durante las actividades físicas leves. Por lo tanto, se propone explorar otro parámetro fisiológico, complementario a la HR, que tiene también una fuerte relación con el VO_2 y el EE.

El rendimiento ventilatorio o ventilación (V_E) también varía durante la actividad física (Saltin y Astrand, 1967; Wasserman et al., 1986) y dos estudios sugieren que la ventilación pulmonar (V_E) podría ser un índice del EE (Durnin y Edwards, 1955; Ford y Hellerstein, 1959). De hecho, la V_E es un parámetro directamente relacionado con el consumo de oxígeno ($VO_2 = V_E \times [F_iO_2 - FeO_2]$), donde F_iO_2 representa la fracción de O_2 en el aire inspirado y FeO_2 es la fracción de O_2 en el aire espirado), y por lo tanto indirectamente relacionado con el EE (Saltin y Astrand, 1967). La V_E es especialmente interesante porque Durnin y Edwards han reportado que, durante el ejercicio de intensidad baja y moderada, cuando la V_E es menor a $50 L \cdot min^{-1}$, el VO_2 de cualquier individuo es directamente proporcional a su V_E .

Además, la V_E no necesariamente requiere la utilización de una máscara facial para la medición. McCool et al. (2002) en este caso propusieron un sistema portátil y liviano para medir la V_E basado en cuatro magnetómetros acoplados. Este sistema, comparado con la medición llevada a cabo por una espirometría, permite una medición precisa del volumen corriente (V_T), el tiempo inspiratorio (TI) y espiratorio (T_E) en posiciones de sentado y de pie y en condiciones de ejercicio. Teniendo en cuenta esta nueva tecnología, ahora podría ser posible utilizar la V_E para estimar el EE. Tal enfoque puede por lo tanto proveer de nuevos prospectos en la estimación del EE, comparados con las limitaciones de las mediciones de la HR. Sin embargo, puede cuestionarse cuál de los dos parámetros la V_E o la HR muestra una mejor correlación con el VO_2 . El propósito de este estudio metodológico es dar respuesta a este interrogante durante las actividades físicas de diferentes intensidades. Entonces, se postula la siguiente hipótesis: durante las actividades físicas de diferentes intensidades, la V_E muestra una correlación más clara con el VO_2 que la HR. Para validar el supuesto, se compararon las relaciones $VO_2 = f(HR)$ y $VO_2 = f(V_E)$ durante las diferentes secuencias de caminata con y sin carga, y durante trabajo intermitente.

El objetivo de este trabajo es comparar los parámetros de la V_E y la HR como indicador del VO_2 y demostrar el interés de la V_E para estimar el EE. Además, es importante destacar que es el primer estudio que elige comparar las dos relaciones, $VO_2 = f(HR)$ y $VO_2 = f(V_E)$, durante las actividades físicas de diferentes intensidades.

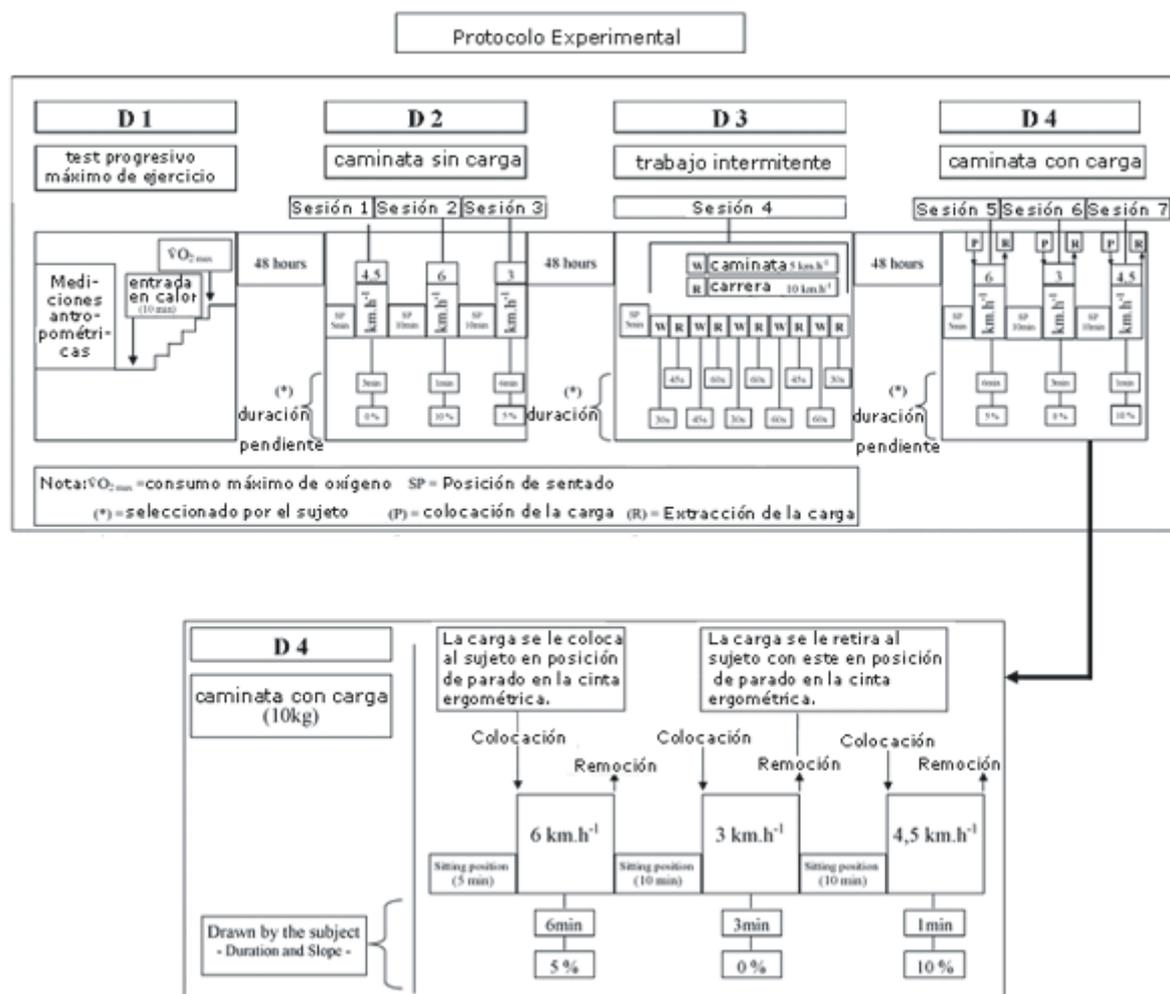


Figura 1. Descripción de los cuatro días (D1, D2, D3 y D4) y detalles de la actividad "caminata con carga" (ejemplo del protocolo experimental del sujeto n°4).

MÉTODOS

Participantes

Doce hombres saludables, de 27.25 ± 4.33 años de edad, formaron parte de este estudio de manera voluntaria. En la Tabla 1 se muestran los valores medios y los errores estándares de las características físicas, el consumo de oxígeno máximo ($\dot{V}O_2 \text{máx}$), y el umbral ventilatorio (V_T). Este estudio se llevó adelante de acuerdo con las directrices instituidas en la Declaración de Helsinki y todos los procedimientos que involucran a sujetos humanos fueron aprobados por el comité de ética local de la Universidad de Rennes 1. Todos los sujetos dieron su consentimiento por escrito. Ninguno de los sujetos reportó enfermedades respiratorias o cardíacas, hipertensión o estar al tanto sufrir de cualquier otra enfermedad crónica.

Diseño del Experimento

En la Figura 1 se esquematiza el protocolo experimental. El primer día de los experimentos (D1) se dedicó a las pruebas de laboratorio, incluyendo las mediciones antropométricas y de composición corporal. Cada sujeto realizó una prueba máxima de ejercicio progresivo en cinta ergométrica para estimar las intensidades relativas de cada ejercicio llevado a cabo en los días D2, el D3 o el D4. Se realizó una entrada en calor de 10 minutos a $8 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. La prueba comenzó en $10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

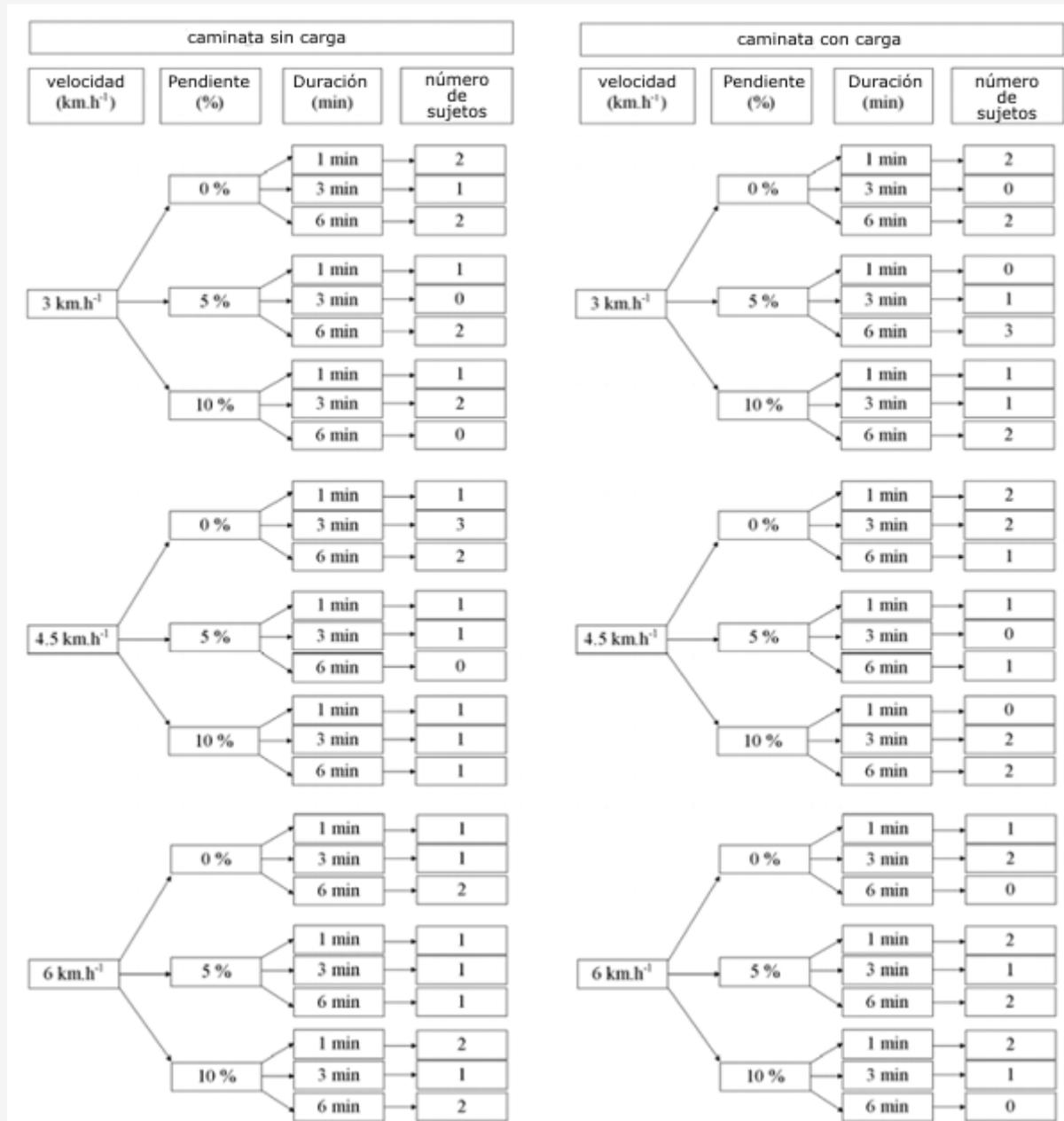


Figura 2. Detalles del protocolo experimental: caminata con y sin carga (68 caminatas).

El incremento de la prueba fue de $1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ cada 3 minutos. Los sujetos recibieron ánimo verbal para continuar con el esfuerzo. Se estimó que los sujetos habían alcanzado su $\text{VO}_2\text{máx}$ cuando se cumplían tres o más de los siguientes criterios; un estado estable de VO_2 a pesar del incremento en la velocidad de la carrera (cambio de VO_2 a $\text{VO}_2\text{máx} \leq 150 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$) (Taylor et al., 1955), un índice de intercambio respiratorio final ($R_{\text{máx}}$) mayor a 1.1, agotamiento visible y una HR al final del ejercicio (HRmáx) dentro de los $10 \text{ latidos}\cdot\text{min}^{-1}$ del máximo estimado [$210 - (0.65 \times \text{edad})$; (Spiro, 1977)]. Durante los tres días siguientes (D2, D3 y D4) cada uno de los sujetos realizó tres tipos de actividades diferentes (caminata sin carga, caminata con carga, trabajo intermitente) en tres días distintos. Cada actividad estuvo separada por un período de 48 horas. Cada sujeto llevó a cabo estas actividades de manera aleatoria. Cada día se inició con 5 minutos de descanso en posición de sentado. Todas estas actividades se realizaron en una cinta ergométrica (Gymrol, super 2500).

La primera actividad consistió en caminata sin carga. Cada sujeto realizó tres sesiones de caminata ($3, 4.5, \text{ y } 6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), el orden fue seleccionado por el sujeto. A partir de entonces, cada sesión de caminata se caracterizó por una duración de tiempo (1, 3, ó 6 minutos) y una pendiente (0, 5, ó 10 %) también seleccionadas por el sujeto. En la Figura 2 se presentan los detalles de la sesión de caminata con y sin carga. Se mantuvo un período de descanso de 10 minutos (sentados) entre cada sesión de caminata. La segunda actividad fue de una caminata con carga. El protocolo fue el mismo que el de la

caminata sin carga. La carga aplicada al sujeto fue una mochila con 10 kg de peso agregado. La carga se le aplicó al sujeto a último momento, justo antes de comenzar la sesión de caminata. Durante los periodos de descanso y entre los distintos pasos, al sujeto se le retiraba la mochila. Por último, la tercera actividad fue el trabajo intermitente. Esta sesión consistió en alternar secuencias de caminata ($5 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) y carrera ($10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$). Una sesión consistió de cinco secuencias consecutivas donde el sujeto elegía de manera aleatoria la duración de cada período de caminata y carrera (30, 45, ó 60 s).

El amplio rango de actividades se llevó a cabo bajo condiciones ambientales controladas. Para todas las actividades, se les pidió a los participantes que evitaran realizar actividad física, ingerir medicamentos, alcohol y tabaco las 24 horas anteriores a la prueba y que realizaran un ayuno durante las dos horas previas. Se les pidió a los sujetos que llegaran al laboratorio 30 minutos antes del comienzo de las mediciones. El D1, las mediciones (VO_2 , V_E , y HR) comenzaron al principio del período de precalentamiento. Los días D2, D3 y D4, las mediciones comenzaron al principio del período de posición de sentados de 5 minutos.

Participantes	Edad (años)	Altura (cm)	Peso (kg)	Grasa corporal (%)	VO_2max ($\text{mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)	V_T (% $\text{VO}_2\text{máx}$)
1	32	179	75.6	17.8	59	51.6
2	21	178	80.4	15.3	58	49.4
3	34	176	71.9	17.9	52	46.8
4	27	184	73.7	7.8	61	53.3
5	27	186	68.3	8.7	62	49.5
6	23	176	76.6	12.4	56	46.6
7	33	179	70.9	16.3	62	47.7
8	31	181	78.7	20.9	54	42.4
9	27	180	76.2	15.3	54	48.5
10	23	171	63.8	12.6	64	56.4
11	24	193	83.3	11.7	58	41.4
12	25	177	71.5	13	56	42.4
Media	27.25	180	74.2	14.1	58	48
DE	4.33	5.64	5.40	3.85	3.74	4.53

Tabla 1. Datos de las características físicas, el consumo de oxígeno máximo (VO_2max) y el umbral ventilatorio (V_T). $\text{VO}_2\text{máx}$: Consumo de oxígeno máximo ($\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$), % $\text{VO}_2\text{máx}$: Porcentaje del consumo de oxígeno máximo, DE: Desviación estándar.

Mediciones del Intercambio de Gases y la Frecuencia Cardíaca

Se realizaron mediciones respiración por respiración del intercambio de gases con un analizador MetaLyser 3B® (Cortex Biophysic, Leipzig, Alemania). El flujo de aire espirado se midió con un transductor de volumen (Triple V® turbine, digital) conectado a un analizador de O_2 . Los gases espirados se analizaron para el oxígeno (O_2) con celdas electroquímicas y para la exhalación de dióxido de carbono (CO_2) con un analizador infrarrojo ND. Antes de cada prueba, el MetaLyser 3B® se calibró de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Después de un período de precalentamiento de 60 minutos, el analizador de CO_2 y O_2 se calibró con el aire de la habitación así como con un gas de referencia de composición conocida (5% CO_2 , 15% O_2 , y 80% N_2), y el volumen se calibró con cinco inspiraciones y espiraciones con una bomba de 3 litros. El consumo de oxígeno (VO_2) y la ventilación (V_E) se midieron y exhibieron continuamente en la pantalla de la computadora. El electrocardiograma (Delmar Reynolds Medical®, CardioCollect 12) también fue monitoreado continuamente en ambos periodos, el de descanso y el activo. La frecuencia cardíaca se derivó del intervalo R-R del ECG. El registro del ECG se exhibió continuamente en la pantalla de la computadora. Se calcularon los datos completos (VO_2 , V_E , y HR) durante cada respiración, y los datos de muestreo de cada aliento se transfirieron a una computadora para ser exhibidos de inmediato. Los datos registrados se grabaron en la base de datos interna de MetaSoft® para realizar un análisis preciso del rendimiento después de la prueba. Los datos de VO_2 , V_E y HR se promediaron cada 5 segundos para el análisis estadístico.

Determinación del Umbral Ventilatorio (V_T)

El V_T se determinó el D1 durante la prueba de ejercicio incremental máximo. Para determinar el V_T para cada sujeto se utilizó el criterio de Wasserman (Wasserman et al., 1990): el umbral corresponde al punto de quiebre en la relación V_E/VO_2 , mientras que la relación V_E/VCO_2 permanece estable. El V_T lo determinaron de manera visual dos investigadores

independientes.

Cálculo de Intensidad de la Sesión

Para evaluar la intensidad de cada sesión, se eligió expresarla como el valor promedio de VO_2 y como un porcentaje del $VO_{2\text{máx}}$. El valor promedio de VO_2 se calculó sobre el tiempo total de cada sesión. Luego estos valores individuales de VO_2 se promediaron para obtener el $VO_{2\text{promedio}}$ y el porcentaje de $VO_{2\text{máx}}$ para cada grupo de actividad (Tabla 2). El valor promedio de V_E y HR se calculó sobre el tiempo total de cada sesión. Estos valores individuales de V_E y HR se promediaron para obtener la $V_{E\text{promedio}}$ y la HR_{promedio} .

Parte 1: Actividades físicas en estado estable de consumo de oxígeno							
Sujetos (n = 12)		Intensidades				$r^2_{\text{sesión}}$	
		$VO_{2\text{promedio}}$	% $VO_{2\text{máx}}$	$V_{E\text{promedio}}$	HR_{promedio}	$VO_2=f(V_E)$	$VO_2=f(HR)$
Grupo 1	20 % $VO_{2\text{máx}} < I$ < 55 % $VO_{2\text{máx}}$	1.45 (.54)	33.4 (10.8)	30.3 (10.2)	96 (18)	0.87 (**)	0.61
	20 caminatas : 3 min						
Grupo 2	17 % $VO_{2\text{máx}} < I$ < 62 % $VO_{2\text{máx}}$	1.42 (.56)	33.5 (13.1)	30.7 (12.3)	92 (19)	0.80 (**)	0.50
	26 caminatas : 6 min						
Parte 2: Actividades físicas en estado no estable de consumo de oxígeno							
Sujetos (n = 12)		Intensidades				$r^2_{\text{sesión}}$	
		$VO_{2\text{promedio}}$	% $VO_{2\text{máx}}$	$V_{E\text{promedio}}$	HR_{promedio}	$VO_2=f(V_E)$	$VO_2=f(HR)$
Grupo 3	13 % $VO_{2\text{máx}} < I$ < 40 % $VO_{2\text{máx}}$	1.05 (0.32)	24.2 (7.6)	23.6 (6.5)	89 (12)	0.82 (**)	0.63
	22 caminatas : 1 min						
Grupo 4	40 % $VO_{2\text{máx}} < I$ < 60 % $VO_{2\text{máx}}$	2.02 (0.20)	47.1 (4.5)	46.0 (4.7)	114 (13)	0.82 (*)	0.73
	12 trabajos intermitentes						

Tabla 2. Intensidades ($VO_{2\text{promedio}}$, % $VO_{2\text{máx}}$, $V_{E\text{promedio}}$, HR_{promedio}) y coeficientes de determinaciones ($r^2_{\text{sesión}}$) de las relaciones $VO_2=f(V_E)$ y $VO_2=f(HR)$. Los datos son medias (\pm DE). $VO_{2\text{promedio}}$: Consumo de oxígeno promedio ($L \cdot \text{min}^{-1}$), DE: Desviación estándar, % $VO_{2\text{máx}}$: Porcentaje del consumo de oxígeno máximo, $V_{E\text{promedio}}$: Ventilación promedio ($L \cdot \text{min}^{-1}$), HR_{promedio} : Frecuencia cardiaca (latidos $\cdot \text{min}^{-1}$), VO_2 : Consumo de oxígeno ($L \cdot \text{min}^{-1}$), V_E : Ventilación ($L \cdot \text{min}^{-1}$), HR: Frecuencia cardiaca (latidos $\cdot \text{min}^{-1}$), I: intensidad. * y ** indican $p < 0.05$ y 0.01 respectivamente.

Sujetos (n = 12)	Coeficientes de determinaciones: r^2_{sujeto}	
	$VO_2=f(V_E)$	$VO_2=f(HR)$
1	0.954	0.867
2	0.854	0.917
3	0.871	0.891
4	0.906	0.865
5	0.879	0.784
6	0.939	0.915
7	0.919	0.727
8	0.928	0.814
9	0.921	0.886
10	0.945	0.891
11	0.874	0.720
12	0.886	0.711
Promedio	0.906 (*)	0.832
Desviación Estándar	0.033	0.078

Tabla 3. Coeficiente de determinación (r^2_{sujeto}) de las relaciones $VO_2=f(V_E)$ y $VO_2=f(HR)$, por sujeto, sobre la duración total de las

Distribución de las Sesiones de Actividades en Diferentes Intensidades dentro de los Cuatro Grupos Principales

Se programaron ochenta y cuatro sesiones ya que cada sujeto llevó a cabo siete sesiones de actividades (tres actividades de caminata sin carga + tres actividades de caminata con carga + un trabajo intermitente). Sin embargo, cuatro de las sesiones no se tuvieron en cuenta, pues cuatro de las sesiones de caminata de dos sujetos se excluyeron por errores de medición. Por lo tanto, la cantidad total de sesiones incluidas en este estudio fue de 80.

Para analizar los resultados, el amplio rango de actividades se clasificó en dos partes diferentes. Cada parte se ideó en dos grupos diferentes. Esta clasificación se llevó adelante de acuerdo a la duración de cada actividad (Tabla 2).

- La parte 1 incluye actividades con estado estable de consumo de oxígeno. El primer grupo (Grupo 1) incorporó actividades de caminata con o sin carga ($n=20$) por una duración de 3 minutos y a una intensidad de entre el 20 y el 55% del $VO_{2\text{máx}}$. El segundo grupo (Grupo 2) incorporó sesiones de caminata con o sin carga ($n=26$) durante 6 minutos y a una intensidad de entre el 17 y el 62 % del $VO_{2\text{máx}}$.
- La parte 2 incluye actividades sin estado estable de consumo de oxígeno. El tercer grupo (Grupo 3) incorporó actividades de caminata con o sin carga ($n=22$) durante 1 minuto y a una intensidad de entre el 13 y el 40% del $VO_{2\text{máx}}$. Por último, el cuarto grupo (Grupo 4) se constituyó por el trabajo intermitente ($n = 12$) con una intensidad de entre el 40 y el 60 % del $VO_{2\text{máx}}$.

Cálculo de los Coeficientes de Determinación

Para confirmar la hipótesis (que la V_E muestra una correlación más clara con el VO_2 que la HR), se propuso comparar las relaciones $VO_2 = f(\text{HR})$ y $VO_2 = f(V_E)$ durante varias sesiones de actividades, utilizando los coeficientes de determinación (r^2). Los r^2 se calcularon mediante la combinación de todas las actividades en dos formas diferentes. Primero, para todas las sesiones de actividades ($n=80$), se estableció una regresión lineal entre los parámetros de VO_2 y V_E y entre el VO_2 y la HR ($n = 160$ regresiones). El r^2 se calculó sobre el tiempo total de cada sesión ($r^2_{\text{sesión}}$). Para los cuatro grupos diferentes, todos los valores individuales de $r^2_{\text{sesión}}$ fueron promediados y se reportan en la Tabla 2. Segundo, para cada sujeto ($n=12$), se incorporaron los grupos de datos de VO_2 , V_E y HR de las siete sesiones individuales. De los grupos de valores de cada sujeto, se estableció una regresión lineal entre el VO_2 y la V_E y el VO_2 y la HR ($n = 24$ regresiones). El r^2 se calculó sobre el tiempo total de las siete sesiones individuales de cada sujeto (r^2_{sujeto}). Los valores del r^2_{sujeto} se reportan en la Tabla 3.

Análisis Estadísticos

Se utilizó la prueba de Mann Whitney para calcular el nivel de significancia de las correlaciones y para especificar si existieron diferencias significativas entre el $r^2_{\text{sesión}}$ de las relaciones $VO_2 = f(\text{HR})$ y $VO_2 = f(V_E)$ de cada grupo de actividades. La misma prueba se aplicó para calcular el nivel de significancia de los valores promedio del r^2_{sujeto} . Los valores de $p < 0.05$ se consideraron significativos.

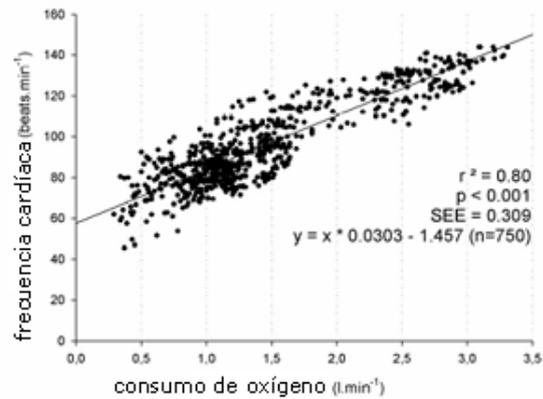
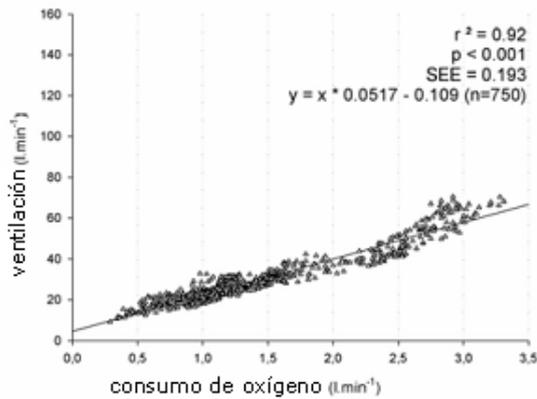
RESULTADOS

Coefficiente de Determinación de los Cuatro Grupos de Actividades Diferentes (Tabla 2 y Figura 3).

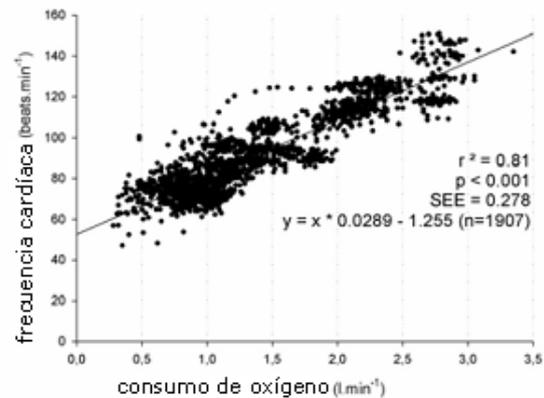
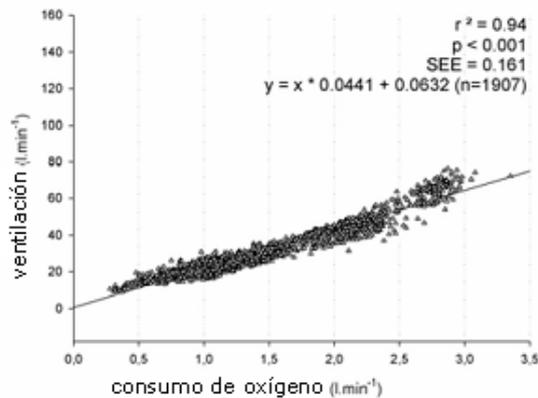
Los valores promedio del $r^2_{\text{sesión}}$ de las relaciones $VO_2 = f(\text{HR})$ y $VO_2 = f(V_E)$ para los cuatro grupos de actividades diferentes se presentan en la Tabla 2. El $r^2_{\text{sesión}}$ de las regresiones lineales de la relación $VO_2 = f(V_E)$ fue significativamente mayor que el obtenido de la relación $VO_2 = f(\text{HR})$ para el primer (ejercicio de caminata con y sin carga, entre el 20 y el 55% del $VO_{2\text{máx}}$ y para una duración de 3 minutos, $p < 0.01$), el segundo (ejercicio de caminata con y sin carga, entre el 17 y el 62% del $VO_{2\text{máx}}$ y para una duración de 6 minutos, $p < 0.01$), el tercer (ejercicio de caminata con y sin carga, entre el 13 y el 40% del $VO_{2\text{máx}}$ y para una duración de 1 minuto, $p < 0.01$) y el cuarto grupo de actividades (trabajo intermitente, entre el 40 y el 60 % del $VO_{2\text{máx}}$, $p < 0.05$).

La Figura 3 muestra la regresión lineal de las relaciones $VO_2 = f(V_E)$ y $VO_2 = f(\text{HR})$ para los cuatro grupos de actividades diferentes. Los gráficos unen todos los datos de cada grupo de actividades ($n = 750$, $n = 1907$, $n = 295$ y $n = 1140$ para los grupos 1, 2, 3 y 4 respectivamente) El error de estimación estándar (SEE) se calculó y se mencionó en cada gráfico.

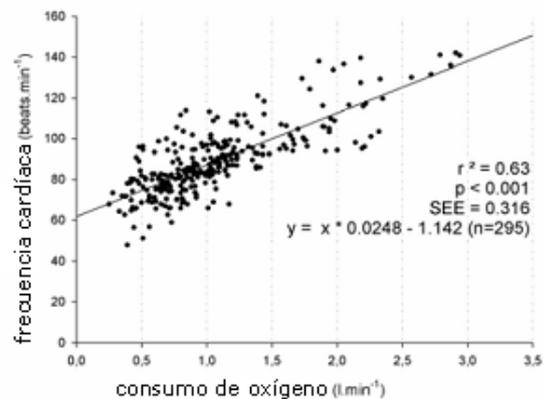
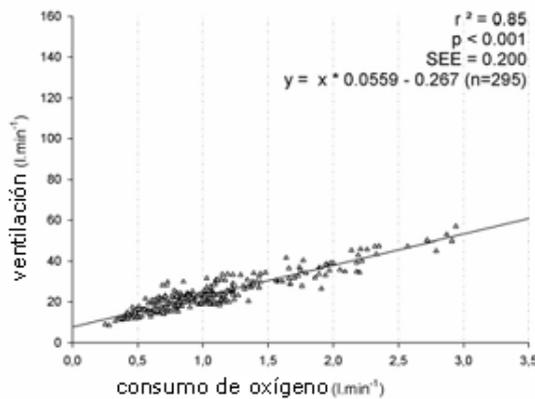
- Grupo 1: caminata con o sin carga durante 3 min, 20 caminatas



- Grupo 2: caminata con o sin carga durante 6 min, 26 caminatas



- Grupo 3: caminata con o sin carga durante 1 min, 22 caminatas



- Grupo 4: trabajo intermitente, 12 ejercicios

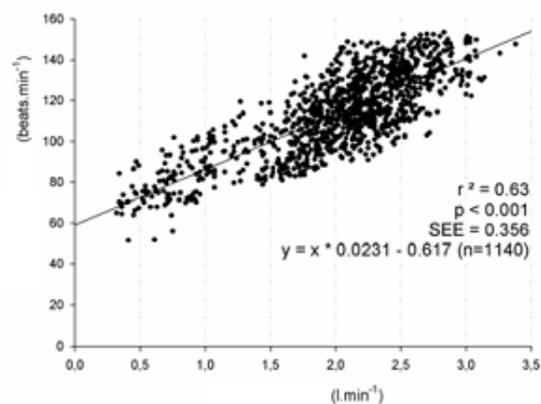
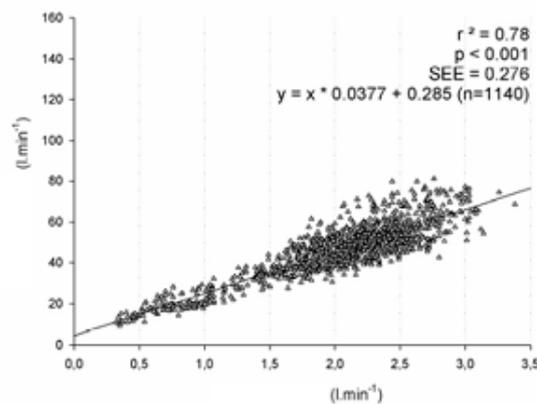


Figura 3. Regresiones lineales (r^2 , p y SEE) de las relaciones $VO_2 = f(V_E)$ y $VO_2 = f(HR)$ sobre los datos recopilados del grupo 1 (caminata con o sin carga durante 3min, 20 caminatas), del grupo 2 (caminata con o sin carga durante 6 min, 26 caminatas), del grupo 3 (caminata con o sin carga durante 1 min, 22 caminatas) y del grupo 4 (trabajo intermitente, 12 ejercicios).

Coefficiente de Determinación, por Sujeto, sobre la Duración Total de las Siete Sesiones (Tabla 3)

En la Tabla 3 están representados los valores individuales del r^2_{sujeto} de las relaciones $VO_2 = f(HR)$ y $VO_2 = f(V_E)$. El r^2_{sujeto} de las regresiones lineales de la relación $VO_2 = f(V_E)$ es siempre más elevado que los que surgen de la relación $VO_2 = f(HR)$, excepto por los sujetos 2 y 3. El valor promedio del r^2_{sujeto} de la regresión lineal de la relación $VO_2 = f(V_E)$ fue significativamente más elevado que el obtenido de la relación $VO_2 = f(HR)$ ($p < 0.05$).

DISCUSION

El propósito de este estudio ha sido comparar la relación entre $VO_2 = f(V_E)$ y $VO_2 = f(HR)$ durante las actividades físicas de diferentes intensidades: caminata con o sin carga, con o sin pendiente durante varias duraciones y alternando entre diferentes períodos de caminata y carrera (Ainsworth et al., 2000). Se ha escogido aplicar una carga de 10 kg. para cada sujeto porque este peso podría corresponder a individuos que utilizan una mochila para llevar libros, computadoras en condiciones de vida independiente. Por lo que se ha escogido este protocolo de ejercicios porque la vida diaria se caracteriza por actividades leves y moderadas, llevadas a cabo en un orden aleatorio de breves duraciones (Ainsworth et al. 2000). Por esta razón las actividades de caminata con y sin carga se caracterizaron por una duración y una pendiente seleccionadas por el propio sujeto. Las mismas razones han llevado a calificar el trabajo intermitente en una duración aleatoria.

La intensidad de cada ejercicio de caminata y trabajo intermitente se definió a partir del $VO_{2\text{promedio}}$ calculado sobre el tiempo total del ejercicio. Esta metodología se ha observado en todas las duraciones de ejercicio (1min, 3min, 6min y trabajo intermitente). El cálculo del $VO_{2\text{promedio}}$ está vinculado al cálculo del coeficiente de determinación llevado a cabo para cada ejercicio (teniendo en cuenta el tiempo total de cada ejercicio). No obstante, este método ha obligado a dividir los ejercicios en dos grupos. El primer grupo consistió de ejercicios realizados con un estado estable de VO_2 (caminata durante 3 y 6 min). Se tomaron en cuenta los períodos en tránsito y en estado estable a fin de calcular el $VO_{2\text{promedio}}$. El segundo grupo consistió de ejercicios sin estado estable de consumo de oxígeno (caminata durante 1 min y trabajo intermitente). La totalidad de la variación del VO_2 se toma en cuenta para calcular el $VO_{2\text{promedio}}$. Este cálculo es una estimación de la intensidad del ejercicio. Por ultimo, no se buscó calcular la intensidad de cada caminata y cada carrera del trabajo intermitente.

El rango de valores de los coeficientes de determinación ($r^2_{\text{sesión}}$, r^2_{sujeto}) demuestra que la V_E muestra una correlación más clara con el VO_2 que la HR (Tabla 2 y 3). Las intensidades promedio de las sesiones están incluidas entre el 24.2 y el 47.08% del $VO_{2\text{máx}}$. En general se considera a un ejercicio de intensidad leve a un nivel de entre 1 a 3 METs o menor al 45% del $VO_{2\text{máx}}$, y a un ejercicio de intensidad moderada de entre 3 a 6 METs o menor al 60% del $VO_{2\text{máx}}$ (Friedlander et al., 2007; Smith y Morris, 1992; Swain y Franklin, 2006). Por lo tanto, los resultados del estudio confirman la hipótesis planteada inicialmente. Además, es el primer estudio que demuestra que la V_E muestra una correlación más clara con el VO_2 que con la HR en especial durante actividades de intensidades leves a moderadas. A fin de validar esta suposición, se ha elegido calificar las relaciones $VO_2 = f(V_E)$ y $VO_2 = f(HR)$ mediante una regresión lineal.

En 1967, Saltin y Astrand mostraron que durante un ejercicio incremental, el incremento de la V_E en relación al VO_2 es semi-lineal, volviéndose la progresión de la V_E relativamente más importante que el VO_2 a mayores intensidades de ejercicio. Se observa un incremento exponencial para las intensidades de ejercicio energéticas, que son mayores al 65% del $VO_{2\text{máx}}$. Davis et al. (1976) a partir del criterio de la ventilación observado en sujetos de 30 años de edad, con valores del V_T de $58.6 \pm 5.8\%$ (media \pm DE) del $VO_{2\text{máx}}$ durante ejercicio en cinta ergométrica (Davis et al., 1976). En el presente estudio, las intensidades de cada sesión de los sujetos permanecen inferiores al 65% del $VO_{2\text{máx}}$. Además, las intensidades promedio de todas las sesiones llevadas a cabo por los sujetos se encuentran cercanas a su V_T ($V_{T\text{promedio}} = 48 \pm 4.53\%$ (media \pm DE) del $VO_{2\text{máx}}$). Por lo tanto, los valores de V_E y VO_2 permanecen ubicados en la parte lineal de la curva. Estos valores de V_E concuerdan con el estudio de Durnin y Edwards, que reportan que cuando la V_E es menor que $50 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, el VO_2 de cualquier individuo es directamente proporcional a su V_E . En efecto, los valores de V_E son de $30.25 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} (\pm 10.22)$, $30.69 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} (\pm 12.27)$, $23.64 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} (\pm 6.53)$ y $46.03 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1} (\pm 4.74)$ para los grupos 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

La relación $VO_2 = f(HR)$ también se caracteriza por una regresión lineal. Esta relación es ampliamente aceptada para un ejercicio físico que es progresivo, involucra importantes masas musculares, y es lo suficientemente extenso para permitir la adaptación de los sistemas cardiovasculares y ventilatorios (Astrand y Ryhming, 1954). Por lo tanto, existe una relación lineal para un amplio rango de intensidades de ejercicio (tradicionalmente del 30% al 70/5 del $VO_{2\text{máx}}$), tales como los que se presentan en este estudio (del 24.2 al 47.08% del $VO_{2\text{máx}}$). En consecuencia, los valores de HR y VO_2 permanecen ubicados en la parte lineal de la curva. Sin embargo, durante la actividad leve y altamente intensa, esta relación se vuelve no lineal (Achten y Jeukendrup, 2003).

A fin de comparar estos resultados con otros estudios (Durnin y Edwards, 1955; Ford y Hellerstein, 1959; Livingstone, Robson, 2000; Spurr et al., 1988), se ha elegido, en concordancia con estos estudios, una regresión lineal para comparar las dos relaciones $VO_2 = f(V_E)$ y $VO_2 = f(HR)$, para todas las sesiones llevadas a cabo con los sujetos del presente estudio.

El resultado más interesante de este estudio es que el $r^2_{\text{sesión}}$ de la relación $VO_2 = f(V_E)$ es significativamente más elevado que el $r^2_{\text{sesión}}$ de la relación $VO_2 = f(HR)$ para los grupos 1, 2, 3 y 4 (Tabla 2). Además, se observa este resultado durante el ejercicio con un estado estable de consumo de oxígeno (caminata con o sin carga durante 3 o 6 min), y durante el ejercicio sin un estado estable de consumo de oxígeno (caminata con o sin carga durante 1 min o trabajo intermitente). Otro resultado interesante se observa cuando se reúnen los conjuntos de mediciones de las sesiones realizadas por cada sujeto (caminata con y sin carga, trabajo intermitente). Para 10 de los 12 sujetos, el coeficiente de determinación r^2_{sujeto} de la relación $VO_2 = f(V_E)$ es más elevado que el r^2_{sujeto} de la relación $VO_2 = f(HR)$ (Tabla 3). Además, el coeficiente promedio de la relación $VO_2 = f(V_E)$ es significativamente más elevado que el coeficiente promedio de la relación $VO_2 = f(HR)$.

Las diferencias entre $r^2_{\text{sesión}}$ y r^2_{sujetos} de las relaciones $VO_2 = f(V_E)$ y $VO_2 = f(HR)$ pueden explicarse mediante los diferentes mecanismos de control de V_E y HR (Strange et al., 1993; Whipp y Ward, 1982). Hasta la fecha, ningún estudio ha podido predecir, en un nivel estrictamente fisiológico, el interés preferencial para la utilización de la HR en comparación con la V_E para estimar el VO_2 .

Sin embargo, muchos argumentos que se mencionaron con anterioridad implican que la V_E parece ser un parámetro que muestra una relación mucho mejor con el VO_2 que la HR, en particular durante las actividades físicas de diferentes intensidades. Por lo tanto, se justifica pensar que podría establecerse una relación entre la V_E y el VO_2 para estimar el EE comenzando sólo desde la medición de la V_E . Es interesante desarrollar un nuevo dispositivo para medir la V_E de un sujeto de manera no invasiva. Esta innovación haría posible medir la V_E en condiciones de vida diaria (intensidades de leves a moderadas). Actualmente es posible medir de manera precisa la V_T , el TI, y el T_E y calcular la V_E gracias a un dispositivo no invasivo que utiliza la magnetometría (McCool et al., 2002). En la actualidad se está desarrollando un dispositivo liviano y portátil que permite la medición directa de la V_E en base al acoplamiento de cuatro magnetómetros. Este dispositivo no tiene carácter invasivo y pronto podría utilizarse para estimar el EE en condiciones de vida independiente. Además, los nuevos dispositivos portátiles (Actiheart y Sensor-Wear Armband) demuestran el valor agregado de combinar varios parámetros y representar sin duda las soluciones futuras para estimar el EE en condiciones de vida independiente.

A partir de este modelo, sería posible acoplar la HR a otro parámetro fisiológico para superar las dificultades del método de HR para estimar el EE durante los niveles bajos de actividad. Entonces, la V_E estimaría el EE durante la actividad leve a moderada, y la HR sería un parámetro complementario para mejorar la estimación del EE durante la actividad moderada que requiere importantes masas musculares. Sería necesario integrar este sistema a la vestimenta (camisa o camiseta) para hacer posible el procesamiento de las mediciones bajo circunstancias de la vida diaria.

CONCLUSION

Este estudio demuestra que la V_E muestra una correlación más clara con el VO_2 que con la HR en actividades físicas de diferentes intensidades. Este resultado confirma el interés de buscar la V_E para estimar el EE.

Puntos Clave

- La ventilación muestra una correlación más clara con el consumo de oxígeno que con la frecuencia cardiaca durante las actividades físicas de diferentes intensidades.
- Este estudio muestra el interés de buscar la ventilación a fin de estimar el gasto de energía.
- Este estudio es un enfoque prometedor para desarrollar un nuevo método para estimar el gasto de energía.
- Una perspectiva interesante podría ser el desarrollo de un dispositivo liviano y portátil para medir la ventilación en base al acoplamiento de cuatro magnetómetros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a todos los sujetos por su participación en el estudio. Este estudio ha sido financiado a través del proyecto SVP ("SurVeiller pour Prévenir"). No hay conflicto de intereses en la presente investigación. Los cinco autores han participado en el desarrollo y la implementación del protocolo, y la redacción de este artículo.

REFERENCIAS

1. Achten, J. and Jeukendrup, A.E (2003). Heart rate monitoring: applications and limitations. *Sports Medicine* 33(7), 517-538
2. Ainsworth, B.E., Haskell, W.L., Whitt, M.C., Irwin, M.L., Swartz, A.M., Strath, S.J., O'Brien, W.L., Bassett, D.R., Jr., Schmitz, K.H., Emplaincourt, P.O., Jacobs, D.R. Jr. and Leon, A.S (2000). Compendium of physical activities: an update of activity codes and MET intensities. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 32, S498-S504
3. Astrand, P.O. and Ryhming, I (1954). A nomogram for calculation of aerobic capacity (physical fitness) from pulse rate during sub-maximal work. *Journal of Applied Physiology* 7, 218-221
4. Bassett, D.R., Ainsworth, B.E. and Swartz, A.M (2000). Validity of four motion sensors in measuring moderate intensity physical activity. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 32, S471-S480
5. Bouchard, D.R. and Trudeau, F (2008). Estimation of energy expenditure in a work environment: comparison of accelerometry and oxygen consumption/heart rate regression. *Ergonomics* 51, 663-670
6. Brage, S., Brage, N., Franks, P.W., Ekelund, U. and Wareham, N.J (2005). Reliability and validity of the combined heart rate and movement sensor Actiheart. *European Journal of Clinical Nutrition* 59, 561-570
7. Corder, K., Brage, S. and Ekelund, U (2007). Accelerometers and pedometers: methodology and clinical application. *Current Opinion in Clinical Nutrition and Metabolic Care* 10, 597-603
8. Corder, K., Brage, S., Wareham, N.J. and Ekelund, U (2005). Comparison of PAEE from combined and separate heart rate and movement models in children. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 37, 1761-1767
9. Davidson, L., McNeill, G., Haggarty, P., Smith, J.S. and Franklin, M.F (1997). Free-living energy expenditure of adult men assessed by continuous heart-rate monitoring and doubly-labelled water. *The British Journal of Nutrition* 78, 695-708
10. Davis, J.A., Vodak, P., Wilmore, J.H., Vodak, J. and Kurtz P (1976). Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise. *Journal of Applied Physiology* 41, 544-550
11. Durnin, J.V. and Edwards, R.G (1955). Pulmonary ventilation as an index of energy expenditure. *Quarterly Journal of Experimental Physiology and Cognate Medical Sciences* 440, 370-377
12. Ford, A.B. and Hellerstein, H.K (1959). Estimation of energy expenditure from pulmonary ventilation. *Journal of Applied Physiology* 14, 891-893
13. Friedlander, A.L., Jacobs, K.A., Fattor, J.A., Horning, M.A., Hagobian, T.A., Bauer, T.A., Wolfel, E.E. and Brooks, G.A (2007). Contributions of working muscle to whole body lipid metabolism are altered by exercise intensity and training. *American Journal of Physiology* 292, E107-116
14. Fruin, M.L. and Rankin, J.W (2004). Validity of a multi-sensor armband in estimating rest and exercise energy expenditure. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 36, 1063-1069
15. Garet, M., Boudet, G., Montaurier, C., Vermorel, M., Coudert, J. and Chamoux, A (2005). Estimating relative physical workload using heart rate monitoring: a validation by whole-body indirect calorimetry. *European journal of applied physiology* 94, 46-53
16. Haskell, W.L., Yee, M.C., Evans, A. and Irby, P.J (1993). Simultaneous measurement of heart rate and body motion to quantitate physical activity. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 25, 109-115
17. Hiilloskorpi, H.K., Pasanen, M.E., Fogelholm, M.G., Laukkanen, R.M. and Manttari, A.T (2003). Use of heart rate to predict energy expenditure from low to high activity levels. *International Journal of Sports Medicine* 24, 332-336
18. King, G.A., Torres, N., Potter, C., Brooks, T.J. and Coleman, K.J (2004). Comparison of activity monitors to estimate energy cost of treadmill exercise. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 36, 1244-1251
19. Kurpad, A.V., Raj, R., Maruthy, K.N. and Vaz, M (2006). A simple method of measuring total daily energy expenditure and physical activity level from the heart rate in adult men. *European Journal of Clinical Nutrition* 60, 32-40
20. Livingstone, M.B., Robson, P.J. and Totton, M (2000). Energy expenditure by heart rate in children: an evaluation of calibration techniques. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 32, 1513-1519
21. McCool, F.D., Wang, J. and Ebi, K.L (2002). Tidal volume and respiratory timing derived from a portable ventilation monitor. *Chest* 122, 684-691
22. Melanson, E.L., Jr. and Freedson, P.S (1996). Physical activity assessment: a review of methods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 36, 385-396
23. Montoye, H., Kemper, H. and Saris, W (1996). Measuring physical activity and energy expenditure. *Human Kinetics*. 72-79
24. Nilsson, A., Brage, S., Riddoch, C., Anderssen, S.A., Sardinha, L.B., Wedderkopp, N., Andersen, L.B. and Ekelund, U (2008). Comparison of equations for predicting energy expenditure from accelerometer counts in children. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports* 18, 643-650
25. Plasqui, G. and Westerterp, K.R (2007). Physical activity assessment with accelerometers: an evaluation against doubly labeled

- water. *Obesity (Silver Spring)* 15, 2371-2379
26. Ravussin, E. and Gautier, J.F (2002). Determinants and control of energy expenditure. *Annales d'Endocrinologie* 63, 96-105
 27. Rayson, M.P., Davies, A., Bell, D.G. and Rhodes-James, E.S (1995). Heart rate and oxygen uptake relationship: a comparison of loaded marching and running in women. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 71, 405-408
 28. Saltin, B. and Astrand, P.O (1967). Maximal oxygen uptake in athletes. *Journal of Applied Physiology* 23, 353-358
 29. Smith, G.D. and Morris, J.N (1992). Assessment of physical activity, and physical fitness, in population surveys. *Journal of Epidemiology and Community Health* 46, 89-91
 30. Spiro, S.G (1977). Exercise testing in clinical medicine. *British Journal of Diseases of the Chest* 771, 145-172
 31. Spurr, G.B., Prentice, A.M., Murgatroyd, P.R., Goldberg, G.R., Reina, J.C. and Christman, N.T (1988). Energy expenditure from minute-by-minute heart-rate recording: comparison with indirect calorimetry. *The American Journal of Clinical Nutrition* 48, 552-559
 32. Strange, S., Secher, N.H., Pawelczyk, J.A., Karpakka, J., Christensen, N.J., Mitchell, J.H. and Saltin, B (1993). Neural control of cardiovascular responses and of ventilation during dynamic exercise in man. *The Journal of Physiology* 470, 693-704
 33. Swain, D.P. and Franklin, B.A (2006). Comparison of cardioprotective benefits of vigorous versus moderate intensity aerobic exercise. *The American Journal of Cardiology* 997, 141-147
 34. Taylor, H.L, Buskirk, E., and Henschel, A (1955). Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratory performance. *Journal of Applied Physiology* 8, 73-80
 35. Wasserman, K., Beaver, W.L. and Whipp, B.J (1990). Gas exchange theory and the lactic acidosis (anaerobic) threshold. *Circulation* 81, III4-30
 36. Wasserman, K., Whipp, B. and Casaburi, R (1986). Respiratory control during exercise. In: Handbook of Physiology: The Respiratory System, a Control of Breathing. Eds: Fishman, A., Cherniak, N.S. and Widdicombe, J.G. Bethesda MD: Am. Physiol. Soc. 595-620
 37. Westerterp, K.R (1999). Assessment of physical activity level in relation to obesity: current evidence and research issues. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 31, S522-525
 38. Whipp, B.J and Ward, S.A (1982). Cardiopulmonary coupling during exercise. *The Journal of Experimental Biology* 100, 175-193

Cita Original

Steven Gastinger, Anthony Sorel, Guillaume Nicolas, Arlette Gratas-Delamarche and Jacques Prioux. A Comparison between Ventilation and Heart Rate as Indicator of Oxygen Uptake during Different Intensities of Exercise. *Journal of Sports Science and Medicine* (2010) 9, 110 - 118.