Monograph

Indicadores Fisiológicos, Biomecánicos y Antropométricos del Rendimiento del Esprint de Natación en Nadadores Adolescentes

Evelin Lätt[1], Jaak Jürimäe[1], Jarek Mäestu[1], Priit Purge[1], Raul Rämson[1], Kaja Haljaste[1], Kari L Keskinen[2], Ferran A Rodríguez[3] y Toivo Jürimäe[1]

[1]*Faculty of Exercise and Sport Sciences, Institute of Sport Pedagogy and Coaching Sciences, University of Tartu, Tartu, Estonia.*
[2]*Finnish Society of Sport Sciences, Helsinki, Finland.*
[3]*Instituí Nacional d'Educació Física de Catalunya, Sport Sciences Research Group, Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain.*

RESUMEN

El propósito de este estudio ha sido analizar las relaciones entre el rendimiento durante una prueba de 100 metros estilo crol y los parámetros biomecánicos, antropométricos y fisiológicos relevantes en nadadores masculinos adolescentes. Veinticinco nadadores masculinos (media ± DE: edad 15.2 ± 1.9 años; altura 1.76 ± 0.09 m; masa corporal 63.3 ± 10.9 kg) realizaron un test de nado de 100 m totales en estilo crol en una piscina de 25 m. Para recolectar el aire espirado se utilizó un sistema respiratorio consistente en un esnórquel y una válvula con baja resistencia hidrodinámica. Se midió el consumo de oxígeno respiración por respiración mediante un carro metabólico portátil. La velocidad de nado, la frecuencia de brazada (SR), la longitud de brazada y el índice de brazada (SI) se evaluaron durante el test por medio de un análisis de tiempo-movimiento en video. Las muestras de sangre para la medición de lactato se tomaron de la yema del dedo, antes del ejercicio y al tercer y quinto minuto de la recuperación a fin de estimar la concentración neta de lactato en sangre (ΔLa). El costo de energía del nado se calculó a partir de los valores equivalentes energéticos del consumo de oxigeno y lactato en sangre. La antropometría básica incluyó la altura corporal, la masa corporal y la longitud del brazo. Los parámetros de composición corporal se midieron utilizando una absorciometría de rayos x de energía dual (DXA). Los resultados indican que los factores biomecánicos (90.3%) explicaron la mayor parte de la variabilidad en el rendimiento en el nado de 100 metros en estilo crol en estos nadadores masculinos adolescentes, seguidos por los parámetros antropométricos (45.8%) y fisiológicos (45.2%). El SI fue el mejor indicador único del rendimiento, mientras que la longitud del brazo y la ΔLa fueron los mejores indicadores antropométricos y fisiológicos, respectivamente. El SI y la SR solos explicaron el 92.6% de la varianza en el rendimiento competitivo. Estos resultados confirman la importancia de tener en cuenta los parámetros técnicos específicos de la brazada a la hora de predecir el éxito en los nadadores jóvenes.

Palabras Clave: consumo de oxígeno, índice de brazada, costo energético, crol

INTRODUCCION

Al analizar el rendimiento del esprint de natación deben tenerse en cuenta ciertas características antropométricas, incluyendo la altura corporal, la longitud del brazo y la masa magra corporal (Jürimäe et al., 2007; Strzala y Tyka, 2009). Estos atributos somáticos en gran parte se heredan y determinan la técnica de nado en un alto grado. No obstante, los datos de la relación entre las propiedades antropométricas, la capacidad física y el rendimiento del esprint en natación son escasos en nadadores adolescentes. Dado que las capacidades metabólicas, como la adquisición de las habilidades, se ven afectadas por el crecimiento y el desarrollo (Malina, 1994), se puede sugerir que los factores que predicen el rendimiento en el nado pueden variar para los nadadores jóvenes y pueden ser diferentes al compararlos con los adultos. De hecho, Geladas et al. (2005) hallaron que el total de la longitud de la extremidad superior, la potencia de la pierna y la fuerza de agarre de la mano podrían utilizarse como indicadores del rendimiento en una prueba de 100 metros estilo crol en niños de 12-14 años de edad. Un análisis multivariado del rendimiento en el nado en una muestra grande (n = 66) de nadadores masculinos (11-12 años) de alto nivel nacional halló que las variables de predicción que pertenecen a los dominios antropométricos (altura de sentado), fisiológicos (velocidad aeróbica y rendimiento) y técnicos (índice de nado) explicaron el 82.4% del rendimiento competitivo (Saavedra et al., 2010). En términos generales, al parecer las características somáticas cumplen un papel importante en el rendimiento del nado durante los años de crecimiento.

El costo energético es un parámetro clave para evaluar el rendimiento en la natación y se ha descrito como un indicador del rendimiento en la locomoción humana, tanto en entornos terrestres como acuáticos (di Prampero, 1986; Zamparo et al., 2005b). Tradicionalmente, se define al costo energético del nado (C_s) como el gasto total de energía requerido para desplazar el cuerpo sobre una unidad de distancia determinada (di Prampero et al., 1986; Pendergast et al., 2003). Kjendlie et al. (2004a) reportaron un costo energético significativamente más bajo en los niños (varones de 12 años de edad) que en los adultos (hombres de 21 años de edad) a velocidades de nado comparables, confirmando de este modo los resultados obtenidos por Ratel y Poujade (2009) en un grupo de niños de 12-13 años y de hombres adultos de 18-22 años. El C_s aumenta en función de la velocidad (Capelli et al., 1998; Poujade et al., 2002) y a menudo se ha evaluado a partir de la relación entre el consumo de oxigeno (VO_2) y la velocidad correspondiente (v_s) en los nadadores (Kjendlie et al., 2004a). Al calcular el C_s en base al VO_2 y la velocidad, existen dos maneras de computarlo. Algunos investigadores utilizan el VO_2-v^3 para ilustrar el C_s con una función lineal (Kjendlie et al., 2004a; 2004b), aunque comúnmente se utiliza la relación VO_2-v (función curvilínea) (Barbosa et al., 2008; Capelli et al., 1998; Poujade et al., 2002; Zamparo et al., 2005a). No obstante, es importante que también se tenga en cuenta el metabolismo anaeróbico (Barbosa et al. 2005b, Barbosa et al., 2006), dada su contribución relativamente más elevada en la distancia de 100 m.

El reciente desarrollo de una mejor instrumentación y tecnología en el análisis respiración por respiración ha dado como resultado nuevos métodos para estudiar el VO_2 también en entornos acuáticos. La última generación de carros metabólicos en miniatura con muestreo respiración por respiración se puede utilizar en combinación con esnorquels recientemente desarrollados para medir directamente los parámetros cardiorrespiratorios durante el nado con aceptable precisión y confiabilidad (Keskinen et al., 2003; Rodriguez et al., 2008). Esta instrumentación también se ha utilizado para caracterizar la cinética del VO_2 en el nado libre (Barbosa et al., 2006; Rodriguez et al., 2003). Sin embargo, no se han llevado a cabo estudios que utilicen el análisis de gas respiración por respiración para determinar el consumo de oxígeno y el C_s durante el esprint de natación en nadadores adolescentes.

La comprensión del comportamiento de la mecánica de la brazada y su relación con la v_s es uno de los puntos de interés más importantes en la investigación biomecánica de la natación (Keskinen y Komi, 1993; Kjendlie et al., 2006; Toussaint et al., 2006). Los incrementos y disminuciones en la v_s se deben a un incremento o disminución combinada en la frecuencia de la brazada (SR) y la longitud de la brazada (SL) (Keskinen y Komi, 1993; Toussaint et al., 2006). Se considera que la mecánica de la brazada alcanza un equilibrio óptimo entre la SR y la SL cuando los valores de v_s están en su nivel más elevado con un C_s relativamente bajo (Barbosa et al., 2008). Se ha demostrado que los incrementos en la v_s máxima desde la edad de 11 años están relacionados con una SL incrementada, mientras que la SR a la v_s máxima no aumenta con la edad (Kjendlie et al., 2004b). Según la literatura, a una v_s determinada, el C_s aumenta de manera significativa con el incremento en la SR (Barbosa et al., 2005a; Zamparo et al., 2005b). Menos constante es la disminución del C_s con el incremento en la SL (Barbosa et al., 2005a; Costill et al., 1985; Pendergast et al., 2003; Zamparo et al., 2005b). Elevados valores del índice de brazada (SI) están fuertemente asociados a valores bajos de C_s (Costill et al., 1985). En este sentido, y según los autores referidos, el SI también puede utilizarse como estimación general de la eficacia del nado.

Según se sabe, ningún estudio ha investigado la influencia de los diferentes parámetros antropométricos, fisiológicos y técnicos juntos para determinar el rendimiento de esprint en natación en nadadores jóvenes. Asimismo existe una carencia de estudios que utilicen la tecnología de muestreo respiración por respiración, y de este modo poder caracterizar el consumo de oxígeno durante el nado en nadadores adolescentes. Por consiguiente, el propósito de este estudio ha sido estudiar la contribución de los diferentes parámetros antropométricos, fisiológicos y biomecánicos al rendimiento de

esprint de natación en varones adolescentes. Se ha planteado la hipótesis de que el rendimiento de nado a esa temprana edad podría predecirse a partir de una cantidad relativamente baja de variables seleccionadas que pertenecen a estos tres dominios evaluación.

METODOS

Participantes

Veinticinco nadadores masculinos adolescentes (15.2 ± 1.9 años) participaron en el estudio. Todos los nadadores tenían antecedentes de entrenamiento de 5.6 ± 1.5 años y en los últimos dos años habían estado practicando durante 5.6 ± 1.5 hs/semana. A los nadadores se los reclutó en clubes locales de natación y su participación fue voluntaria. La edad biológica se midió según el método de Tanner (Tanner y Whitehouse, 1976), que utiliza la autoevaluación del desarrollo de los genitales y la fase de vello púbico en los varones. A los participantes se les entregaron fotografías, figuras y descripciones y se les pidió que eligieran la que reflejaba de manera más precisa su aspecto. Este estudio ha sido aprobado por el Comité de Ética Médica de la Universidad de Tartu. A todos los nadadores y a sus padres se les informó sobre los propósitos y métodos del estudio, y los padres dieron un consentimiento por escrito antes de la participación.

Procedimientos

Los tests y las evaluaciones se llevaron a cabo en dos ocasiones diferentes durante el período de estudio. En una primera visita, se evaluaron los parámetros antropométricos y la edad biológica. El mismo día, hubo una segunda sesión de evaluación que consistió de un test de nado de 100 m totales en estilo crol en la piscina. Al segundo día, se midieron los parámetros de composición corporal.

Antropometría y composición corporal

La altura corporal se midió con una precisión de 0.1 cm utilizando un antropómetro Martin, la masa corporal (kg) se midió con una precisión de 0.05 kg utilizando básculas médicas calibradas (A&D Instruments Ltd., UK), y luego se calculó el índice de masa corporal (IMC; $kg \cdot m^{-2}$). Además, la longitud del brazo se midió con una precisión de 0.1 cm. Las evaluaciones antropométricas fueron llevadas a cabo por un antropometrista ISAK nivel 1 certificado internacionalmente.

La masa grasa corporal (kg), la masa libre de grasa (kg), la masa ósea (kg), la densidad mineral ósea total ($g \cdot cm^{-2}$) y la densidad mineral ósea ($g \cdot cm^{-2}$) de la columna (L1-L4) se midieron por medio de un DXA, utilizando el densitómetro DPX-IQ (Lunar Corporation, Madison, WI, EUA) equipado con el programa del fabricante. El procedimiento lo llevó a cabo un radiólogo calificado. El coeficiente de variación (CV) para la masa grasa corporal, la masa libre de grasa, la masa ósea y la densidad mineral ósea medidas fue menor al 2%.

Test de Nado Máximo

Durante el test de natación de 100 m totales en estilo crol llevado a cabo en una piscina de 25 m se evaluaron el C_s de nado, el consumo de oxígeno pico en el nado (VO_2pico) y los parámetros de la brazada. Restringidos como estaban por los dispositivos para la recolección de muestras de gases, los nadadores comenzaron sin zambullirse desde el borde y no realizaron los habituales movimientos de giro al final del andarivel, en cambio reanudaban el nado de inmediato sin deslizarse debajo del agua después de dar la vuelta. Las vueltas se realizaban hacia el mismo lado en ambos extremos de la piscina para evitar la distorsión de la línea de muestra del analizador de gases. Los nadadores realizaron una pasada de 400 m a modo de entrada en calor, seguido de un período de descanso pasivo de 10 minutos antes de realizar el test de 100 m totales. Para recolectar las muestras de aire espirado se utilizó un sistema respiratorio de esnórquel y válvula con baja resistencia hidrodinámica (Keskinen et al., 2003; Rodriguez et al., 2008; Toussaint et al., 1987) y se conectó a un analizador telemétrico de gases portátil respiración por respiración (Metamax-3B, Cortex, Leipzig, Alemania) (Aspenes et al., 2009). Los valores se promediaron en períodos de 10 s. El dispositivo respiratorio, conectado a un analizador de gases portátil de características técnicas similares (K4 b^2, Cosmed, Italia), ha demostrado buena validez y precisión (Keskinen et al., 2003; Rodriguez et al., 2008) y se ha utilizado en trabajos publicados recientemente (Barbosa et al., 2005a; Rodriguez et al., 2003). El rendimiento de nado se evaluó a partir del tiempo en segundos. Los nadadores se familiarizaron con el esnórquel nadando 100 m a una velocidad moderada con el aparato respiratorio precediendo la prueba máxima.

Las muestras de sangre capilar para la medición de concentración de lactato en sangre (La; $mmol \cdot L^{-1}$) se tomaron de las yemas de los dedos antes del ejercicio y al tercer (La_3) y quinto (La_5) minuto durante el período de recuperación (Capelli et al., 1998), y se analizaron utilizando el método enzimático fotométrico (Lange Microanalyzer, Lange GMBH, Berlin,

Alemania). El incremento neto de la concentración de lactato en sangre (ΔLa) se obtuvo restando el valor pre-prueba del valor pico alcanzado durante la fase de recuperación.

A fin de excluir la influencia del giro y el comienzo, la velocidad de nado promedio (v_s; m/s) alcanzada por cada nadador durante la prueba se midió en un tramo de 15 m determinado por dos puntos que tenían una separación 5.0 m a cada extremo de la piscina (v_s= D/t15, donde D = 15 m y t15 = tiempo para los 15 m de distancia) (Poujade et al., 2002; Zamparo et al., 2005a).

Los parámetros de velocidad de nado y la brazada se midieron mediante un análisis de tiempo-movimiento en video (Huot-Marchand et al., 2005), realizado por dos evaluadores independientes. La SR (ciclos·min^{-1}) se calculó como la cantidad promedio de brazadas completadas por los nadadores durante la distancia de 15 m (Poujade et al., 2002). Un ciclo de SR se define como el tiempo transcurrido a partir de la entrada de una mano hasta la siguiente entrada de la misma mano (Huot-Marchand et al., 2005). La SL (m·ciclo^{-1}) se calculó como el índice entre la velocidad promedio y la correspondiente SR (Poujade et al., 2002). El SI (m^2·s^{-1}·ciclo^{-1}) se calculó multiplicando la velocidad de nado por la SL (Costill et al., 1985). El gasto energético total (E_{TOT}; mLO$_2$·kg^{-1}·min^{-1}) tomado en cuenta para la masa corporal se calculó utilizando el VO$_2$ neto (i.e. la diferencia entre el valor medido al final de la prueba de 100 m y el valor en el descanso), y el equivalente energético del oxígeno de la concentración neta de lactato en sangre (i.e, la diferencia entre el valor medido al final de la tarea y el valor en el descanso) (Rodriguez 1999). Se supuso que el equivalente energético del VO$_2$ fue de 2.7 mLO$_2$·kg^{-1}·min^{-1}, como el propuesto por di Prampero et al. (1978) para los nadadores competitivos. El C_s se calculó como el índice entre el E_{TOT} y la v_s (mLO$_2$·m^{-1}), y luego se convirtió en unidades de SI (kJ·m^{-1}), suponiendo que 1 mLO$_2$ es equivalente a 20.1 J (di Prampero et al., 1986; Pendergast et al., 2003).

Análisis Estadísticos

La normalidad de distribución de todos los datos se evaluó utilizando el test de Kolmogorov-Smirnov. Se calcularon las medias, las desviaciones estándar y los valores mínimos y máximos para todos los parámetros (Tabla 1). Los coeficientes de correlación parcial (r_p) con la edad como variable de control se utilizaron para determinar el grado de asociación entre las variables de evaluación y el rendimiento en el nado. Para cada tipo de evaluación se utilizó el análisis de regresión lineal por pasos con eliminación progresiva (*backward stepwise linear regression analyses*) a fin de evaluar las relaciones potenciales con el rendimiento de nado y para analizar qué grupo de parámetros (i.e., antropométricos, fisiológicos, biomecánicos) caracterizaban mejor el rendimiento de nado. Además, se desarrollaron modelos de regresión lineal múltiple (MLR) utilizando el procedimiento por pasos hacia atrás ingresando todas las variables. A un valor de $p < 0,05$ se lo consideró estadísticamente significativo. Para todos los análisis se utilizó el programa SPSS para Windows, versión 13.0; (SPSS Inc.; Chicago, IL).

RESULTADOS

El tiempo medio (± DE) de rendimiento en 100 m fue de 77.6 ± 9.1 s. La v_s media sin comienzo con deslizamiento ni giros fue de 1.34 ± 0.14 m·s^{-1}. En la Tabla 1 se presentan las estadísticas descriptivas para los parámetros antropométricos, fisiológicos y biomecánicos y su relación con el tiempo de rendimiento de 100 m en estilo crol con la edad como variable de control. El análisis de correlación parcial dio como resultado que el rendimiento en el nado mostró una correlación significativa ($p < .05$) con la altura corporal, la masa ósea, la densidad mineral ósea de la columna y la longitud del brazo (parámetros antropométricos), la SR y el SI (parámetros biomecánicos), y el C_s, el La_3, el La_5 y la ΔLa (parámetros fisiológicos). La SL mostró una correlación con la v_s, pero no con los 100 m.

Variable	Media (±DE)	min	máx	Correlación parcial con el tiempo de 100 m (r_p)
Altura corporal (cm)	1.76 (0.09)	1.52	1.89	-0.536*
Masa corporal, MC (kg)	63.3 (10.9)	45.0	89.0	-0.480
Índice de masa corporal, IMC ($kg \cdot m^{-2}$)	20.2 (2.2)	15.6	24.9	-0.247
Grasa corporal (%)	12.8 (3.3)	7.5	18.4	0.061
Masa grasa corporal total, (kg)	8.0 (2.2)	4.1	11.6	-0.174
Masa libre de grasa, (kg)	54.7 (9.6)	39.0	77.4	-0.506
Masa ósea, (kg)	2.7 (0.6)	1.60	3.84	-0.543*
Densidad mineral ósea total ($g \cdot cm^{-2}$)	1.12 (0.10)	0.95	1.33	-0.462
Densidad mineral ósea de la columna, ($g \cdot cm^{-2}$)	1.06 (0.15)	0.79	1.28	-0.516*
Longitud del brazo (cm)	182.8 (11.5)	152.5	200.5	-0.557*
Velocidad, v_S ($m \cdot s^{-2}$)	1.34 (0.14)	1.01	1.57	-0.938*
Largo de brazada, ($m \cdot ciclo^{-1}$)	1.00 (0.09)	0.84	1.22	-0.506
Frecuencia de brazada, SR ($ciclo \cdot min^{-1}$)	40.2 (2.9)	35.0	46.0	-0.785*
Índice de brazada, SI ($m^2 \cdot s^{-1} \cdot ciclo^{-1}$)	1.35 (0.24)	0.85	1.83	-0.643*1
VO_2pico ($L \cdot min^{-1}$)	3.51 (0.82)	2.31	5.72	-0.398
VO_2pico ($ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$)	55.2 (5.9)	44.4	70.6	-0.017
ΔVO_2 ($L \cdot min^{-1}$)	3.02 (0.79)	1.86	5.31	-0.322
La_3 ($mmol \cdot L^{-1}$)	6.40 (2.81)	2.64	14.20	-0.525*
La_5 ($mmol \cdot L^{-1}$)	6.58 (3.03)	2.65	14.20	-0.574
Concentración de lactato en sangre, ΔLa ($mmol \cdot L^{-1}$)	4.9 (3.0)	0.61	12.6	-0.598
Costo energético del nado, C_S ($kJ \cdot m^{-1}$)	3.99 (1.78)	1.31	8.50	-0.544*
Etapa de maduración sexual de Tanner (1-5)	3.9 (1.02)	2	5	-0.285

Tabla 1. *Parámetros antropométricos, fisiológicos y biomecánicos y su relación con el rendimiento en el nado de 100 m en estilo crol en nadadores adolescentes (n = 25). Los datos son medias (± desviaciones estándar, DE), valores mínimos y máximos, y coeficientes de correlación parcial (r_p) con la edad como variable de control. *Correlación estadísticamente significativa ($p < 0.05$); controlada también para la velocidad de nado.*

Variables	Variables ingresadas en el modelo	R^2	R^2 Ajustado	t	p	F	p
Biomecánicas	SR, SI	0.911	0.903	19.902	0.000	(2;24) = 112.87	0.000
Antropométricas	Longitud del brazo, altura, masa ósea, Densidad mineral ósea de la columna	0.559	0.458	4.115	0.001	(4;16) = 5.503	0.012
Fisiológicas	Δla, La_3, La_5, C_S	0.551	0.452	4.558	0.000	(4;22) = 5.531	0.004
En todas las variables	SR, SI	0.936	0.926	16.867	0.000	(2;15) = 94.412	0.000

Tabla 2. *Análisis de regresión lineal por pasos con eliminación progresiva para evaluar las relaciones potenciales con el rendimiento en el nado y para analizar qué grupo de parámetros (i.e., antropométricos, fisiológicos, biomecánicos) caracterizan mejor el rendimiento en el nado. Se desarrollaron modelos de regresión lineal múltiple (MLR) utilizando el procedimiento de paso a paso hacia atrás ingresando todas las variables.*

Los análisis de regresión lineal múltiple demostraron que el SI (R2 = 0.788; p = 0.000), la longitud del brazo (R^2 = 0.485; p = 0.001), y la ΔLa (R^2 = 0.317; p = 0.003) fueron los mejores indicadores generales del rendimiento de los 100 m en nadadores adolescentes, respectivamente. Por lo tanto, a partir de este análisis, al parecer los factores biomecánicos que se ingresaron al modelo (Tabla 2) caracterizaron mejor el rendimiento en el nado de 100 m en estos nadadores

adolescentes (90.3%; $p < 0.05$), seguidos de los factores antropométricos (45.8%; $p < 0.05$) y fisiológicos (45.2%; $p < 0.05$). Sólo se ingresaron estos parámetros a los modelos que guardaban una relación significativa con el rendimiento en el nado. El modelo de regresión lineal múltiple para todas las variables relacionadas con el rendimiento en el nado de 100 m indicó que dos parámetros biomecánicos (SI y SR) explicaron el 92.6% de la varianza (Tabla 2).

Además, dado que el C_s guardó relación con el tiempo de nado, se evaluó la posible contribución de los diferentes parámetros para el C_s. El análisis de correlación parcial mostró que el C_s guardó una relación significativa con la v_s ($r = 0.576$; $p = 0.025$), el La_3 ($r = 0.580$; $p = 0.000$), el La_5 ($r = 0.632$; $p = 0.000$) y la ΔLa ($r = 0.646$; $p = 0.000$), pero no con el VO_2 ($r = 0.377$; $p = 0.833$) ni el ΔVO_2 ($r = 0.288$; $p = 0.072$).

DISCUSION

Este estudio investigó la contribución de los diferentes parámetros antropométricos, fisiológicos y biomecánicos al rendimiento de esprint en natación en varones adolescentes. Los principales hallazgos son: (1) que los factores biomecánicos pueden explicar el 90.3% de la varianza en el rendimiento del nado de 100 m; (2) que los parámetros antropométricos (45.8%) y fisiológicos (45.2%) también guardaron una fuerte relación con el rendimiento de los 100 m; (3) que los mejores indicadores únicos del rendimiento fueron el SI, la longitud del brazo y la ΔLa; y 4) que dos variables seleccionadas, incluidas en el modelo de MLR para todas las variables (SI y SR), explicaron el 92.6% de la varianza en el rendimiento del nado de 100 m en estos nadadores adolescentes.

Pocos estudios han investigado la relación de los diferentes parámetros biomecánicos y fisiológicos con el rendimiento en los 100 m en estilo crol en nadadores adolescentes (Kjendlie et al., 2004a; 2004b). Los nadadores comienzan duros entrenamientos a una edad relativamente temprana, por lo tanto, es importante evaluar qué parámetros pueden ser los mejores indicadores del rendimiento en el esprint de natación. Esto permite considerar parámetros específicos a la hora de predecir el éxito y planear programas de entrenamiento específicos para nadadores jóvenes.

Los valores de SR obtenidos (40.1 ± 2.8) estuvieron relativamente en el mismo rango que los hallados en otros estudios (Dekerle et al., 2002; Fernandes et al., 2008; Strzala y Tyka, 2009). No obstante, incluso los parámetros de la SL no pueden compararse fácilmente debido a que la mayoría de los estudios no han utilizado un sistema respiratorio de esnórquel que, debido a cierta resistencia, tiene un impacto sobre la SL. En nadadores de elite que utilizan un sistema respiratorio de esnórquel, la SL fue significativamente más elevada en comparación con el presente estudio (Dekerle et al., 2005; Fernandes et al., 2008). Sin embargo, sus participantes también eran significativamente mayores (19 años v_s. 15 años, respectivamente). La presente investigación mostró que los parámetros biomecánicos (SI y SR) guardan una relación cercana con el rendimiento en el nado de 100 m, siendo el SI el mejor indicador único del rendimiento en el nado de 100 m en estos nadadores masculinos adolescentes. Estudios previos han demostrado que el SI guarda una fuerte relación con el rendimiento en el nado en nadadores adolescentes también en distancias más largas (Jürimäe et al., 2007; Lätt et al., 2009a; 2009b), así también es un buen indicador del rendimiento competitivo general (Saavedra et al., 2010). Por lo tanto, parece interesante enfatizar la importancia de enseñar y aprender la técnica de nado correcta desde los primeros años de entrenamiento en el nado, sin importar el evento. Marinho et al., 2010 también recomendaron que las series de entrenamiento específico con relación a la corrección y mejora de la técnica en nadadores jóvenes podrían ser un objetivo a la hora de planear el entrenamiento en la natación.

El C_s es uno de los parámetros comúnmente utilizado para predecir el rendimiento en el nado (Kjendlie et al., 2004a; Poujade et al., 2002; Zamparo et al., 2005b). En el presente estudio el VO_2 se midió utilizando procedimientos modernos para recolectar y medir el gas espirado por respiración, lo que permitió la caracterización de la cinética del VO_2 durante el ejercicio de nado. Se halló que este método es adecuado para evaluar el rendimiento en el nado en nadadores jóvenes (Keskinen et al., 2003; Kjendlie et al., 2004a; Ratel y Poujade, 2009; Rodriguez et al., 2008). No se ha investigado en profundidad el parámetro del VO_2 en sujetos de edades similares. Los valores de VO_2pico obtenidos en el presente estudio estuvieron en el mismo rango que en Strzala et al. (2005), donde los valores de VO_2 se midieron en la distancia de 100 m en adolescentes que pertenecían a la etapa 4-5 de Tanner. No obstante, allí se midió el consumo de oxígeno en un cicloergómetro (Strzala et al. 2005). Otros dos estudios (Dekerle et al., 2005; Fernandes et al., 2008) midieron el VO_2 en la piscina, pero los sujetos eran mayores (19 años) y de un nivel superior, y dio como resultado valores de VO_2pico elevados (> 70 $ml \cdot min^{-1} \cdot kg^{-1}$). El C_s es un parámetro clave para evaluar el rendimiento en el nado, sin embargo sólo existen unos pocos estudios que hayan investigado los factores determinantes del C_s en niños y adolescentes (Kjendlie et al., 2004a; Poujade et al., 2002). Investigaciones previas han hallado relaciones entre el C_s y la altura corporal, la masa corporal y la longitud del brazo en nadadores adolescentes (Jürimäe et al., 2007; Lätt et al., 2009b; Ratel y Poujade, 2009), aunque no es el caso del presente estudio, donde no se hallaron relaciones entre los parámetros antropométricos y el C_s.

En el esprint de natación la v_s parece depender principalmente de la capacidad anaeróbica y la eficacia del nado en nadadores adolescentes (Strzala y Tyka, 2009), aunque también se ha hallado que el VO_2pico guardó una relación significativa con la velocidad de 100 m (r = 0.787) en nadadores adultos (Rodriguez et al., 2003). En el presente estudio el C_s tuvo una correlación significativa con el La_3, el La_5 y la ΔLa, pero no con el valor de VO_2pico, ni de la ΔVO_2. Esto puede explicarse mediante el hecho de que el C_s se calcula en base a ambos gastos energéticos, aeróbico y anaeróbico (Barbosa et al, 2005b; 2006; di Prampero et al., 1986). Se sugiere que en el presente estudio el nado se llevó a cabo de manera bastante extensa en la zona anaeróbica y por lo tanto el C_s general dependió en mayor parte del metabolismo anaeróbico energético. El hecho de que el C_s esté relacionado con el VO_2 puede deberse al papel de los procesos anaeróbicos con respecto al gasto energético total, que no siempre se tiene en cuenta o es evidentemente menos importante cuando se utilizan distancias más largas. No debería ignorarse la contribución relativa de este sistema bioenergético al gasto energético general (Camus y Thys, 1991). Strzala y Tyka (2009) también hallaron que una gran contribución de los procesos anaeróbicos energéticos en los esfuerzos de esprint lleva a una elevada concentración de lactato en sangre después del ejercicio. Los eventos de esprint dependen en gran medida de los procesos anaeróbicos energéticos, aunque la habilidad de los niños para generar energía mediante este sistema es limitada (Taylor et al., 2003), por lo tanto es probable que el C_s no haya guardado una relación con el rendimiento de esprint de 100 m en estilo crol. Al investigar la manera en que se desarrolla el rendimiento anaeróbico durante el crecimiento y la maduración, es posible que se identifique la capacidad de realizar mejoras y proporcionar directrices para que los entrenadores preparen sesiones de entrenamiento específicas para los nadadores jóvenes.

En el presente estudio, los parámetros biomecánicos guardan una relación cercana con el tiempo de 100 m, y el SI fue el mejor indicador del rendimiento. El SI es un indicador de la eficacia técnica del nado, pues los valores más elevados denotan que el nadador cubre una distancia determinada con el tiempo más veloz y con menos cantidad de brazadas. Se ha hallado una relación directa entre el tiempo de nado y la v_s, como se esperaba, y una relación inversa con la SR, lo cual concuerda con estudios previos (Barbosa et al., 2005a; Strzala y Tyka, 2009; Vorontsov y Binevski 2003). Contrariamente a los reportes que dicen que los resultados de nado en estilo crol guardan una relación más fuerte con el SL en nadadores de elite adultos (Arellano et al., 1994; Kennedy et al., 1990), no se ha hallado una relación significativa entre el SL y el tiempo de nado. En cambio, al parecer, el rendimiento en el esprint de natación en nadadores jóvenes depende de la SR y su constancia en un nivel relativamente estable (Alberty et al., 2005 Potdevin et al., 2006; Seifert et al., 2007) y en un incremento más elevado y estable del SL (Seifert et al., 2007). Aunque cabe destacar que la técnica de nado pudo haberse visto afectada por el dispositivo respiratorio, a pesar de la familiarización previa, pues los nadadores debieron realizar el test con cierta incomodidad y no podían girar la cabeza (además, es probable que también se haya reducido su movimiento de giro) ni realizar los giros habituales.

Estudios previos han hallado que el rendimiento de esprint en natación se correlaciona con la masa corporal, la masa magra corporal, la altura corporal y la longitud de brazos (Geladas et al., 2005; Grimston y Hay, 1986; Jürimäe et al., 2007, Silva et al., 2007). En el presente estudio, el tiempo de nado en la prueba de 100 m en estilo crol tuvo una relación significativa con la altura corporal y la longitud del brazo. La relación consecuente entre la altura y el rendimiento de nado podría explicarse mediante el hecho de que los nadadores más altos parecen deslizarse mejor en el agua (Geladas et al., 2005; Toussaint y Hollander, 1994), además los nadadores más altos a menudo muestran una mayor longitud de brazo, lo que beneficia la eficacia del nado (i.e. mayor largo de brazada) (Saavedra et a., 2010). La correlación significativa entre el rendimiento en la prueba de 100 m y la longitud del brazo, lo que concuerda con reportes previos (Geladas et al., 2005: Saavedra et al., 2010), sugiere que la combinación de la longitud de las extremidades superiores y el ancho de hombros puede tener relación con los factores biomecánicos relevantes para la propulsión.

Deben reconocerse ciertas limitaciones del presente estudio. En primer lugar, como se discutió anteriormente, los parámetros de brazada y el rendimiento en la prueba de 100 m pudieron haberse visto afectados por las modificaciones impuestas por el dispositivo respiratorio utilizado para las mediciones del VO_2 (giro de la cabeza, giro del cuerpo, índice respiratorio, vueltas, etc.). Al parecer, la familiarización previa es un requerimiento importante y, además, se debería instruir a los nadadores para disminuir las modificaciones en su técnica. En segundo lugar, no se puede descartar que ciertas correlaciones con el rendimiento de esprint, como de hecho también es evidente en reportes previos, pudieron haber estado influidas por la co-varianza . Tal puede ser el caso del SI (i.e. el mejor indicador del rendimiento), que, por definición, depende de la v_s y el C_s, que se calcula a partir del equivalente energético de la ΔLa. En tercer lugar, no se midió la concentración de lactato en el séptimo minuto posterior al ejercicio, lo cual pudo haber influido en los valores pico del lactato en algunos sujetos. Sin embargo, el incremento posterior de la concentración de lactato desde el tercer al quinto minuto fue relativamente pequeño y sin significancia estadística; por lo tanto, la posible influencia del valor de lactato del séptimo minuto posterior hubiera tenido una influencia muy baja.

CONCLUSION

Los resultados del presente estudio indican que los factores biomecánicos (90.3%) explicaron la mayor parte de la variabilidad en el rendimiento durante una prueba de 100 m estilo crol en estos nadadores masculinos adolescentes, seguidos por los parámetros antropométricos (45.8%) y fisiológicos (45.2%). El SI fue el mejor indicador único del rendimiento, mientras que la longitud del brazo y la ΔLa fueron los mejores indicadores antropométricos y bioenergéticos, respectivamente. El SI y la SR solos explicaron el 92.6% de la varianza en el rendimiento competitivo. Al tomar en cuenta estos resultados, es de suma importancia considerar los parámetros específicos de la técnica de brazada a la hora de predecir el éxito en los nadadores jóvenes.

Puntos Clave

- Este estudio investigó la influencia de los diferentes parámetros antropométricos, fisiológicos y biomecánicos sobre el rendimiento de nado en una prueba de 100 m en varones adolescentes.
- Los factores biomecánicos contribuyeron en gran medida en el rendimiento de esprint de natación en estos jóvenes nadadores masculinos (90.3% de variabilidad en el rendimiento), seguidos de los parámetros antropométricos (45.8%) y fisiológicos (45.2%).
- Dos variables seleccionadas (índice de brazada y frecuencia de brazada) explicaron el 92.6% de la varianza en el rendimiento competitivo de estos nadadores adolescentes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los participantes y a sus entrenadores por el compromiso durante el estudio.

REFERENCIAS

1. Alberty, M., Sidney, M., Hout-Marchand, F, Hespel, J.M. and Pelayo, P (2005). Intracyclic velocity variations and arm coordination during exhaustive exercise in front crawl stroke. *International Journal of Sports Medicine 26, 471-475*
2. Arellano, R., Brown, P., Cappaert, J. and Nelson, R.C (1994). Analysis of 50-, 100-, and 200-m freestyle swimmers at the 1992 Olympic Games. *Journal of Applied Biomechanics 10, 1889-199*
3. Aspenes, S., Kjendlie, P.L., Hoff, J. and Helgerun, J (2009). Combined strength and endurance training in competitive swimmers. . *Journal of Sports Science and Medicine 8, 357-365*
4. Barbosa, T.M., Fernandes, R., Keskinen, K.L., Colaco, P., Cardoso, C., Silva, J. and Vilas-Boas, J.P (2006). Evaluation of the energy expenditure in competitive swimming strokes. *International Journal of Sports Medicine 27, 894-899*
5. Barbosa, T.M., Fernandes, R.J., Keskinen, K.L. and Vilas-Boas, J.P (2008). The influence of stroke mechanics into energy cost of elite swimmers. *European Journal of Applied Physiology 103, 139-149*
6. Barbosa, T.M., Keskinen, K.L., Fernandes, R., Colaco, P., Carmo, C. and Vilas-Boas, J.P (2005). Relationships between energetic, stroke determinants and velocity in butterfly. *International Journal of Sports Medicine 26, 841-846*
7. Barbosa, T.M., Keskinen, K.L., Fernandes, R., Colago, P., Lima, A.B. and Vlas-Boas, J.P (2005). Energy cost and intracyclic varia-tion of the velocity of the centre of mass in butterfly stroke. *European Journal of Applied Physiology 93, 519-523*
8. Camus, G. and Thys, H (1991). An evaluation of the maximal aerobic capacity in man. *International Journal of Sports Medicine 12, 349-355*
9. Capelli, C., Pendergast, D.R. and Termin, B (1998). Energetics of swimming at maximal speeds in humans. *European Journal of Applied Physiology 78, 385-393*
10. Costill, D.L., Kovaleski, J., Porter, D., Kirwan, J., Fielding, R. and King, D (1985). Energy expenditure during front crawl swimming: predicting success in middle-distance events. *International Journal of Sports Medicine 6, 266-270*
11. Dekerle, J., Nesi, X., Lefevre, T., Depretz, S., Sidney, M., Huot-Marchand, F., Pelayo, P (2005). Stroking parameters in front crawl swimming and maximal lactate steady state speed. *International Journal of Sports Medicine 26, 53-58*
12. Dekerle, J., Sidney, M., Hespel, J.M., Pelayo, P (2002). Validity and reliability of critical speed, critical stroke rate, and anaerobic capacity in relation to front crawl swimming performance. *International Journal of Sports Medicine 23, 93-98*
13. Di Prampero, P (1986). The energy cost of human locomotion on land and in water. *International Journal of Sports Medicine 7, 55-72*
14. Di Prampero, P.E., Pendergast, D.R., Wilson, D.W. and Rennie, D.W (1978). Blood lactic acid concentrations in high velocity swim-ming. *In: Swimming Medicine IV. Eds: Eriksson, B. and Fur-berg, B. Baltimore: University Park Press. 249-261*

15. Fernandes, R.J., Keskinen, K.L., Colaco, P., Querido, A.J., Machado, L.J., Morais, P.A., Novais, D.Q., Marinho, D.A. and Vilas Boas, J.P (2008). Time limit at VO2max velocity in elite crawl swim-mers. *International Journal of Sports Medicine 29, 145-150*
16. Geladas, N.D., Nassis, G.P. and Pavlicevic, S (2005). Somatic and physical traits affecting sprint swimming performance in young swimmers. *International Journal of Sports Medicine 26, 139-144*
17. Grimston, S.K. and Hay, J.G (1986). Relationship among anthropometric and stroking characteristics of college swimmers. *Medicine and Science in Sport and Exercise 18, 60-68*
18. Huot-Marchand, F., Nesi, X., Sidney, M., Alberty, M. and Pelayo, P (2005). Variations of stroking parameters associated with 200-m competitive performance improvement in top-standard front crawl swimmers. *Sports Biomechanics 4, 89-99*
19. Kennedy, P., Brown, P., Chengular, S.N. and Nelson, R.C (1990). Analysis of male and female Olympic swimmers in the 100-meters events. *International Journal of Sports Biomechanics 6, 187-197*
20. Keskinen, K.L. and Komi, P.V (1993). Stroking characteristics of front crawl swimming during exercise. *Journal of Applied Biomechanics 9, 219-226*
21. Keskinen, K.L., Rodriguez F.A. and Keskinen, O.P (2003). Respiratory snorkel and valve system for breath-by-breath gas analysis in swimming. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports 13, 322-329*
22. Kjendlie, P.L., Haljand, R., Fjortoft, O. and Stallman, R.K (2006). Stroke frequency strategies of international and national swim-mers in 100-m races. *In: Biomechanics and Medicine in Swim-ming X. Eds: Vilas-Boas, J.P., Alves, F. and Marques, A. Porto, Portugal. 52-54*
23. Kjendlie, P.L., Ingjer, F., Madsan, O., Stallman, R.K. and Stray-Gundersen, J (2004). Differences in the energy cost between children and adults during front crawl swimming. *European Journal of Applied Physiology 91, 473-480*
24. Kjendlie, P.L., Stallman, R.K and Stray-Gundersen, J (2004). Adults have lower stroke rate during submaximal front crawl swimming than children. *European Journal of Applied Physiology 91, 649-655*
25. Malina, R (1994). Physical growth and biological maturation of young athletes. *In: Exercise and sport science reviews. Ed: Holloszy, J. Baltimore: Williams and Wilkins. 389-433*
26. Marinho, D.A., Barbosa, T.M., Costa, M.J., Figueiredo, C., Reis, V.M., Silva, A.J. and Marques, M.C (2010). Can 8-weeks of training affect active drag in young swimmers?. *Journal of Sports Sci-ence and Medicine 9, 71-78*
27. Pendergast, D., Zamparo, P., di Prampero, P.E., Capelli, C., Cerretelli, P., Termin, A., Craig, A. Jr., Bushnell, D., Paschke, D. and Mollendorf, J (2003). Energy balance of human locomotion in water. *European Journal of Applied Physiology 90, 377-386*
28. Potdevin, F., Bril, B., Sidney, M. and Pelayo, P (2006). Stroke frequency and arm coordination in front crawl swimming. *International Journal of Sports Medicine 27, 193-198*
29. Poujade, B., Hautier, C.A. and Rouard, A (2002). Determinants of the energy cost of front-crawl swimming in children. *European Journal of Applied Physiology 87, 1-6*
30. Ratel, S. and Poujade, B (2009). Comparative analysis of the energy cost during front crawl swimming in children and adults. *European Journal of Applied Physiology 105, 543-549*
31. Rodriguez F.A (1999). Cardiorespiratory and metabolic field testing in swimming and water polo: from physiological consepts to prac-tical methods. *In: Biomechanics and Medicine in Swimming VIII. Eds: Keskinen, K.L., Komi, P.V. and Hollander, A.P. Jy-väskylä, Finland: Gummerus Printing. 219-226*
32. Rodriguez, F.A., Keskinen, K.L., Keskinen, O.P. and Malvela, M (2003). Oxygen uptake kinetics during free swimming: a pilot study. *In: Biomechanics and Medicine in Swimming IX. Ed: Chatard, J.C. Saint-Étienne: Publications de l'Université de Saint-Étienne. 379-384*
33. Rodriguez, F.A., Keskinen, K.L., Kusch, M. and Hoffmann, U (2008). Validity of a swimming snorkel for metabolic testing. *International Journal of Sports Medicine 29, 120-128*
34. Saavedra, J.M., Escalante, Y., and Rodriguez, F.A (2010). A multivariate analysis of performance in young swimmers. *Pediatric Exercise Science 22, 135-151*
35. Seifert, L., Chollet, D. and Rouard, A (2007). Swimming constraints and arm coordination. *Human Movement Science 26, 68-86*
36. Silva, A.J., Costa, A.M., Oliveira, P.M., Reis, V.M., Saavedra, J., Perl, J., Rouboa, A. and Marinho, D.A (2007). The use of neural network technology to model swimming performance. *Journal of Sports Science and Medicine 6, 117-125*
37. Strzala, M. and Tyka, A (2009). Physical endurance, somatic indices and swimming technique parameters as determinants of front crawl swimming speed at short distances in young swimmers. *Medicina Sportiva 13, 99-107*
38. Strzala, M., Tyka, A., Zychowska, M., Woznicki, P (2005). Components of physical work capacity, somatic variables and technique in relation to 100 and 400m time trials in young swimmers. *Journal of Human Kinetics 14, 105-116*
39. Tanner, J.M. and Whitehouse, R.H (1976). Clinical longitudinal standards for height, weight, height velocity, weight velocity and stages of puberty. *Archives of Disease in Childhood 51, 170-179*
40. Taylor, S., MacLaren, D., Stratton, G. and Lees, A (2003). The effects of age, maturation and growth on tethered swimming performance. *In: Biomechanics and Medicine in Swimming IX. Ed: Chatard, J.C. Saint-Étienne: Publications de l'Université de Saint-Étienne. 185-190*
41. Toussaint, H.M., Carol, A., Kranenborg, H. and Truijens, M.J (2006). Effect of fatigue on stroking characteristics in an armsonly 100-m front-crawl race. *Medicine and Science in Sports and Exercise 38, 1635-1642*
42. Toussaint, H. and Hollander, P (1994). Energetics of competitive swimming: implications for training programmes. *Sports Medicine 18, 384-405*
43. Toussaint, H.M., Meulemans, A., de Groot, G., Hollander, A.P., Schreurs, A.W. and Ver-Voorn, K (1987). Respiratory valve for oxygen uptake measurements during swimming. *European Journal of Applied Physiology 56, 363-366*
44. Vorontsov, A. and Binevsky, D (2003). Swimming speed, stroke rate and stroke length during maximal 100 m freestyle of boys 11-16 years of age. *Biomechanics and Medicine in Swimming IX. Ed: Chatard, J.C. Saint-Étienne: Publications de l'Université de Saint-Étienne. 195-199*
45. Zamparo, P., Bonifazi, M., Faina, M., Milan, A., Sardella, F., Schena, F. and Capelli, C (2005). Energy cost of swimming of elite long-distance swimmers. *European Journal of Applied Physiology 94, 697-704*

46. Zamparo, P., Pendergast, D., Mollendorf, J., Termin, A. and Minetti, A (2005). An energy balance of front crawl. *European Journal of Applied Physiology 94, 134-144*

Cita Original

Evelin Lätt, Jaak Jürimäe, Jarek Mäestu, Priit Purge, Raul Rämson, Kaja Haljaste, Kari L. Keskinen, Ferran A. Rodriguez and Toivo Jürimäe. Physiological, Biomechanical and Anthropometrical Predictors of Sprint Swimming Performance in Adolescent Swimmers. Journal of Sports Science and Medicine (2010) 9, 398 - 404