

Article

# Intervalos, Umbrales y Larga Distancia: Rol de la Intensidad y la Duración en el Entrenamiento de Resistencia - Parte 1

Stephen Seiler<sup>1</sup> y Espen Tønnessen<sup>2</sup><sup>1</sup>University of Agder, Faculty of Health and Sport, Kristiansand 4604, Norway<sup>2</sup>Norwegian Olympic and Paralympic Committee National Training Center, Oslo, Norway

## RESUMEN

El entrenamiento de resistencia involucra la manipulación de la intensidad, duración y frecuencia de las sesiones de entrenamiento. El impacto relativo del entrenamiento de corta duración y alta intensidad contra el entrenamiento de distancia prolongado y lento ha sido discutido durante décadas entre atletas, entrenadores y científicos. Actualmente, el péndulo de popularidad ha girado hacia el entrenamiento intervalado de alta intensidad. Muchos expertos del entrenamiento, así como algunos científicos, ahora sostienen que el trabajo intervalado de alta intensidad es la única forma de entrenamiento necesaria para optimizar el rendimiento. Las investigaciones sobre el impacto del entrenamiento intervalado continuo en sujetos desentrenados o ligeramente entrenados no apoya la manía que existe en la actualidad sobre el entrenamiento intervalado, pero la evidencia sugiere que las series de entrenamiento cortas de alta intensidad y las sesiones de ejercicios continuos más largas deben formar parte de un entrenamiento de resistencia efectivo. Los atletas de resistencia de élite realizan 80 % o más de su entrenamiento en intensidades claramente por debajo de su umbral del lactato y muy escasamente realizan entrenamiento de alta intensidad. Los estudios que involucran intensificación del entrenamiento en atletas altamente entrenados han obtenido, en el mejor de los casos, resultados equívocos. La evidencia disponible sugiere que la combinación de volúmenes grandes de entrenamiento de baja intensidad con un empleo cuidadoso de entrenamiento intervalado de alta intensidad a lo largo del ciclo de entrenamiento anual, es el mejor modelo de práctica para desarrollar el rendimiento de resistencia.

**Palabras Clave:** umbral del lactato, consumo de oxígeno máximo, VO<sub>2</sub>max, periodización

## INTRODUCCIÓN

La tarde previa al comienzo del congreso Europeo de Ciencias Deportivas de 2009 en Oslo, dos de nosotros estábamos sentados en una cena de defensa de disertación doctoral que formaba parte de la tradición de las "disputas doctorales" en Escandinavia. Uno de nosotros era el relevado disputador (Tønnessen) que había defendido exitosamente su disertación. El otro había desempeñado el rol de adversario "førsteopponent". La investigación de Tønnessen sobre el proceso de desarrollo de talentos incluyó extensos análisis empíricos de las características de entrenamiento de diferentes atletas de resistencia de sexo femenino campeonas mundiales. Sus series de estudios de casos sistematizaron registros de

entrenamiento de aprox. 15000 sesiones de entrenamiento de tres campeonas mundiales y/o olímpicas en tres deportes: carreras de fondo, esquí de fondo y orientación. Algo que tenían en común las tres campeonas era que durante sus largas y exitosas carreras, aprox. 85 % de sus sesiones de entrenamiento fueron realizadas como esfuerzos continuos de intensidad baja a moderada (lactato sanguíneo  $\leq 2$  mM). Entre los 40 invitados sentados había entrenadores, científicos y ex atletas que habían estado involucrados directa o indirectamente en la obtención de una gran cantidad de medallas de oro en olimpiadas y campeonatos mundiales de deportes de resistencia. Un invitado, Dag Kaas, había entrenado a 12 campeones del mundo individuales en cuatro deportes diferentes. En su brindis por el candidato comentó, "Mi experiencia como entrenador me dice que para ser campeón mundial en las disciplinas de resistencia, usted tiene que entrenar de manera INTELIGENTE, Y usted debe entrenar MUCHO. Una cosa sin la otra no es suficiente."

¿Pero que es el entrenamiento de resistencia *inteligente*? La pregunta es oportuna: la investigación y el interés popular sobre el entrenamiento intervalado para la aptitud física, rehabilitación y rendimiento se ha disparado en los últimos años gracias a nuevos estudios de investigación y a un marketing cada vez mayor de varios jugadores de la industria de la salud y del *fitness*. Algunas investigaciones recientes realizadas con sujetos desentrenados o moderadamente entrenados han sugerido que 2-8 semanas con de entrenamiento intervalado de alta intensidad 2-3 veces por semana pueden inducir mejoras rápidas y sustanciales en el metabolismo y en el rendimiento cardiovascular (Daussin et al., 2007; Helgerud et al., 2007; Talanian et al., 2007). Algunos artículos populares de los medios de comunicación han interpretado estos resultados como que las sesiones de larga distancia y constantes son una pérdida de tiempo. Bien fundamentada o no, esta interpretación plantea interrogantes razonables sobre la importancia y la cantidad del entrenamiento de alta (y baja) intensidad en el proceso de entrenamiento global del atleta de resistencia. Nuestra meta con este artículo es discutir este problema de modo que integre la investigación y la práctica.

En vista del reciente enorme interés y de la explosión en la cantidad de estudios que han investigado el entrenamiento intervalado en el ámbito de la salud, la rehabilitación y el rendimiento, uno podría pensar que esta forma de entrenamiento es algo parecido a una píldora de entrenamiento mágica que los científicos habían descubierto recientemente. La realidad es que los atletas han estado utilizando el entrenamiento intervalado durante por lo menos 60 años. Por lo tanto, discutiremos las investigaciones del entrenamiento intervalado antes de abordar la amplia discusión sobre la distribución de la intensidad del entrenamiento en los atletas de resistencia competitivos.

### **Entrenamiento Intervalo: Una Larga Historia**

El entrenador internacional de carreras Peter Thompson escribió en *Athletics Weekly* que a principios de 1990 ya se habían observado claras referencias al "entrenamiento de repetición" (Thompson, 2005). El fisiólogo ganador del Premio Nobel, AV Hill, incorporó el ejercicio intermitente en sus estudios de entrenamiento de sujetos en los años veinte (Hill et al., 1924a; Hill et al., 1924b). Aproximadamente en ese mismo momento, el sueco Gosta Holmer introdujo *Fartlek* a las carreras de fondo (fart = velocidad y lek = juego en sueco). El término específico entrenamiento intervalado se atribuye al preparador alemán Waldemer Gerschler. Influenciado por el trabajo del fisiólogo Hans Reindell a finales de 1930, se convenció que la alternancia de períodos de trabajo duro y recuperación era un estímulo adaptativo eficaz para el corazón. Ambos aparentemente adoptaron el término porque creían que era el intervalo de recuperación lo vital para el efecto de entrenamiento. Desde entonces, se han utilizado los términos *ejercicio intermitente*, *entrenamiento de repetición* y *entrenamiento intervalado* para describir una gran variedad de prescripciones de entrenamiento que consisten en la alternancia de períodos de trabajo y períodos de descanso (Daniels y Scardina, 1984). En los años sesenta, fisiólogos suecos, guiados por Per Åstrand, realizaron investigaciones innovadoras que demostraron cómo la manipulación de la duración del trabajo y la duración del descanso podían afectar dramáticamente las respuestas fisiológicas al ejercicio intermitente (Åstrand et al., 1960; Åstrand I, 1960; Christensen, 1960; Christensen et al., 1960). Como Daniels y Scardina (1984) concluyeron hace 25 años, su trabajo sentó las bases de todas las investigaciones sobre entrenamiento intervalado. En su clásico capítulo *Physical Training* en el libro *Textbook of Work Physiology*, Åstrand y Rodahl (1986) escribieron, "es un importante interrogante aún no solucionado, que tipo de entrenamiento es mas eficaz: mantener un nivel equivalente al 90 % del consumo de oxígeno máximo por 40 min, o alcanzar 100% de la capacidad de consumo de oxígeno por aproximadamente 16 min." (El mismo capítulo de la 4ta edición, publicada en 2003, puede leerse aquí.) Esta cita sirve como un antecedente apropiado para definir entrenamiento intervalado aeróbico de alta intensidad (HIT) del modo en que nosotros lo usaremos en este artículo: *series repetidas de ejercicio con una duración de ~1 a 8 min que provocan una demanda de oxígeno de ~90 a 100 % de  $VO_{2max}$ , separadas por períodos de descanso de 1 a 5 min* (Seiler y Sjørnsen, 2004; Seiler y Hetlelid, 2005).

En los años setenta aparecieron estudios controlados que compararon el impacto fisiológico y sobre el rendimiento del entrenamiento continuo (CT) por debajo del umbral del lactato (típicamente 60-75% de  $VO_{2max}$  durante 30 min o más) y del entrenamiento HIT. Los tamaños de las muestras eran pequeños y los resultados que se obtuvieron fueron mixtos; algunos obtuvieron resultados superiores para HIT (Henriksson y Reitman, 1976; Wenger y Macnab, 1975), otros resultados superiores para CT (Saltin et al., 1976) y otros observaron poca diferencia entre ellos (Cunningham et al., 1979; Eddy et al., 1977; Gregory, 1979). Al igual que la mayoría de los estudios publicados que compararon los dos tipos de

entrenamiento, las intervenciones de CT y HIT comparadas en estos estudios fueron equiparadas en cuanto al trabajo total (isoenergético). En el contexto de cómo los atletas realmente entrenaban y percibían el estrés de entrenamientos, esta situación es artificial, y deberemos volver a ella.

McDougall y Sale (1981) publicaron una de las primeras revisiones dirigida a entrenadores y atletas donde se comparaban los efectos del entrenamiento continuo con los del entrenamiento intervalado. Los autores concluyeron que las dos formas de entrenamiento eran importantes, pero por diferentes razones. Dos afirmaciones fisiológicas que en la actualidad han sido muy refutadas influyeron en su interpretación. Primero, concluyeron que el HIT era superior para inducir cambios *periféricos*, porque la intensidad de trabajo más alta inducía un mayor grado de hipoxia en el músculo esquelético. En la actualidad sabemos que en los sujetos saludables, la mayor acumulación de lactato en sangre durante el ejercicio, no necesariamente se debe a un aumento en la hipoxia muscular (Gladden, 2004). Segundo, los autores concluyeron que dado que el volumen sistólico alcanza un *plateau* (meseta) a 40-50 %  $VO_{2max}$ , las intensidades de ejercicio más altas no favorecerían el relleno ventricular. En la actualidad sabemos que el volumen sistólico continúa aumentando en las intensidades más altas, quizás incluso hasta  $VO_{2max}$ , en los atletas altamente entrenados (Gledhill et al., 1994; Zhou et al., 2001). Asumiendo un *plateau* en el volumen sistólico en intensidad de ejercicio baja, los autores concluyeron que el beneficio del ejercicio para el rendimiento cardíaco provenía de la estimulación de una mayor contractibilidad cardíaca, que según ellos sería máxima en aproximadamente 75 %  $VO_{2max}$ . Por lo tanto, el ejercicio continuo de moderada intensidad y mayor duración, y por consiguiente con una mayor cantidad de latidos, sería más beneficioso para mejorar el rendimiento cardíaco. Si bien las nuevas investigaciones no sustentan estas conclusiones específicas, los autores plantearon un punto importante de que existen características subyacentes de la respuesta fisiológica de HIT y CT que ayudarían a explicar cualquier impacto diferencial en las respuestas adaptativas.

Poole y Gaesser (1985) publicaron un trabajo clásico con sujetos desentrenados en el cual plantearon una comparación de 8 semanas de entrenamiento con 3 entrenamientos semanales durante 55 min a 50 %  $VO_{2max}$ , 35 min a 75 %  $VO_{2max}$ , o 10×2 min a 105 %  $VO_{2max}$  con 2 min de recuperación. No observaron ninguna diferencia en la magnitud del aumento en  $VO_{2max}$  ni en la potencia en el umbral del lactato entre los tres grupos. Sus resultados fueron corroborados por Bhambini y Singh (1985) en un estudio con un diseño similar publicado el mismo año. Gorostiaga et al. (1991) informaron resultados que desafiaban las conclusiones de McDougall y Sale sobre la especificidad adaptativa del entrenamiento continuo e intervalado. En el estudio, sujetos desentrenados realizaron ejercicio durante 30 min, tres días por semana en forma de CT al 50 % de la menor potencia que permitía alcanzar el  $VO_{2max}$ , o en forma de HIT, alternando 30 s al 100% de la potencia en  $VO_{2max}$  y 30 s de descanso, de manera que el trabajo total fuera equiparable. Al contrario de lo planteado en las conclusiones de McDougall y Sales, los autores observaron que el HIT produjo cambios mayores en el  $VO_{2max}$ , mientras que el CT fue más efectivo para mejorar la capacidad oxidativa periférica y el perfil del lactato. A comienzos de los noventa los datos disponibles no permitían contar con un consenso general con respecto a la eficacia relativa del CT contra el HIT para inducir cambios centrales o periféricos relacionados al rendimiento de resistencia.

Veinte años después, se continúa investigando hasta que punto el  $VO_{2max}$ , la utilización fraccionaria de  $VO_{2max}$  y la eficiencia/economía de trabajo se ven afectados diferencialmente por CT y HIT en individuos saludables, inicialmente desentrenados. Los resultados de los estudios siguen siendo mixtos, y algunos estudios no observan ninguna diferencia en las adaptaciones centrales y periféricas entre CT y HIT (Berger et al., 2006; Edge et al. 2006; Overend et al., 1992) mientras que otros observan mayores mejoras con HIT (Daussin et al., 2008a; Daussin et al., 2008b; Helgerud et al., 2007). Cuando se observan diferencias, estas apuntan en el sentido de que el trabajo continuo en intensidades submáximas promueve mayores adaptaciones periféricas y el HIT promueve mayores adaptaciones centrales (Helgerud et al., 2007).

Hasta hace poco tiempo, los estudios controlados donde se comparara directamente CT y HIT en *sujetos altamente entrenados* estaban esencialmente ausentes en la literatura. Sin embargo, en los noventa aparecieron algunos estudios de un solo grupo realizados con atletas de resistencia. Acevedo y Goldfarb (1989) observaron un mejor rendimiento en 10 km y tiempo hasta el agotamiento en cinta rodante al mismo ritmo con una pendiente de 2% en corredores altamente entrenados que aumentaron su intensidad de entrenamiento a 90-95 % de  $VO_{2max}$  en tres de sus entrenamientos diarios por semana. En estos atletas altamente entrenados, el  $VO_{2max}$  no cambió después de 8 semanas de intensificación del entrenamiento, pero se observó un desplazamiento hacia la derecha en el perfil del lactato sanguíneo. En 1996-97, los científicos deportivos sudafricanos publicaron los resultados de una intervención con un solo grupo que involucraba a ciclistas competitivos (Lindsay et al., 1996; Weston et al., 1997). Ellos entrenaron a ciclistas regionales competitivos que fueron seleccionados específicamente para el estudio, basados en el criterio de que no habían realizado ningún entrenamiento intervalado en los 3-4 meses previos al comienzo del estudio. Cuando se reemplazó 15% de su volumen de entrenamiento normal con entrenamiento intervalado 2 días por semana durante 3-4 semanas (seis sesiones de entrenamiento de seis series de 5-min de alta intensidad), se observaron mejoras modestas en el rendimiento en pruebas contrarreloj de 40-km, en la producción de potencia máxima sostenida (PPO), y en el tiempo hasta el agotamiento al 150% de PPO. No se observaron cambios en las mediciones fisiológicas tales como  $VO_{2max}$  y el perfil del lactato. Luego Stepto y colegas abordaron el aspecto de la optimización del entrenamiento intervalado en una muestra similar de ciclistas

entrenados regionalmente que no habían realizado entrenamiento intervalado (Stepho et al., 1999). Los autores compararon series de intervalos que iban de 80 a 175% de la potencia aeróbica máxima (con una duración de 30 s a 8 min, 6-32 min de trabajo total). Los grupos eran de tamaño pequeño (n=3-4), pero el grupo que mejoró consistentemente el rendimiento en el test de resistencia (~3%) había usado intervalos de 4-min a 85 % de la potencia aeróbica máxima (PPO). Estos estudios controlados de intensificación de entrenamiento confirmaron esencialmente lo que atletas y entrenadores conocían hace décadas: algunos entrenamientos intervalados de alta intensidad deben integrarse en el programa de entrenamiento para lograr las mejoras en el rendimiento óptimas. Estos estudios también despertaron mucho interés sobre el papel del HIT en el desarrollo del rendimiento de los atletas que, en los últimos años, se ha acrecentado aún más.

Si con algo de HIT (1-2 series por semana) se le da un empujón al rendimiento, ¿más puede ser mejor?. Billat y colegas exploraron esta pregunta inicialmente en un grupo de corredores de medio fondo que realizaron seis sesiones por semana de CT sólo. Observaron que al aumentar la intensidad del entrenamiento a cuatro sesiones de CT, una sesión de HIT y una sesión en el umbral del lactato (LT, se producían mejoras en la velocidad de carrera en el  $VO_{2max}$  (pero no en el propio  $VO_{2max}$ ) y en la economía de carrera. Una intensificación adicional a dos sesiones de CT, tres sesiones de HIT y una sesión en el LT cada semana no aportó beneficios adaptativos adicionales, pero aumentó el estrés subjetivo frente al entrenamiento y los indicadores de inminente sobreentrenamiento (Billat et al., 1999). De hecho, la intensificación del entrenamiento durante períodos de 2-8 semanas con series de alta intensidad frecuentes (3-4 sesiones por semana) es una manera eficaz de comprometer temporalmente el rendimiento e inducir síntomas de sobreentrenamiento a corto plazo y posiblemente síntomas de sobreentrenamiento en atletas (Halson y Jeukendrup, 2004). Existiría un equilibrio apropiado entre entrenamiento de alta y baja intensidad en la distribución de intensidad diaria del atleta de resistencia. Estos resultados nos permiten plantear dos interrogantes relacionados: ¿cómo entrenan realmente los mejores atletas de resistencia?, y ¿existe una distribución de intensidad de entrenamiento óptima para desarrollar el rendimiento a largo plazo?.

Si bien es posible plantear el argumento que la tradición, resistencia al cambio e incluso la superstición pueden ejercer una influencia negativa sobre los métodos de entrenamiento de los atletas de resistencia de élite, la historia deportiva nos dice que los atletas son innovadores y les gusta experimentar. Observar los métodos de entrenamiento que tienen los mejores atletas de resistencia del mundo, nos aportará una visión mas reveladora de la "mejor práctica" que la que podremos obtener a partir de estudios de laboratorio a corto plazo con sujetos desentrenados o ligeramente entrenados. En el ambiente del rendimiento actual dónde los atletas prometedores tienen tiempo esencialmente ilimitado para entrenar, todos los atletas entrenan mucho y están muy motivados para optimizar el proceso de entrenamiento. Ideas de entrenamiento que parecen buenas pero que no funcionan en la práctica desaparecen. Debido a estas condiciones, nosotros argumentamos que es probable que cualquier modelo consistente de distribución de intensidad de entrenamiento que surja en las disciplinas deportivas, será el resultado de una autoorganización exitosa (evolución) hacia un " óptimo poblacional." El entrenamiento de alto rendimiento es con seguridad un proceso individualizado, pero para nosotros el "óptimo poblacional", representa un enfoque de organización de entrenamiento que permita a la mayoría de los atletas estar saludable, hacer un buen progreso y tener un buen rendimiento en sus eventos más importantes.

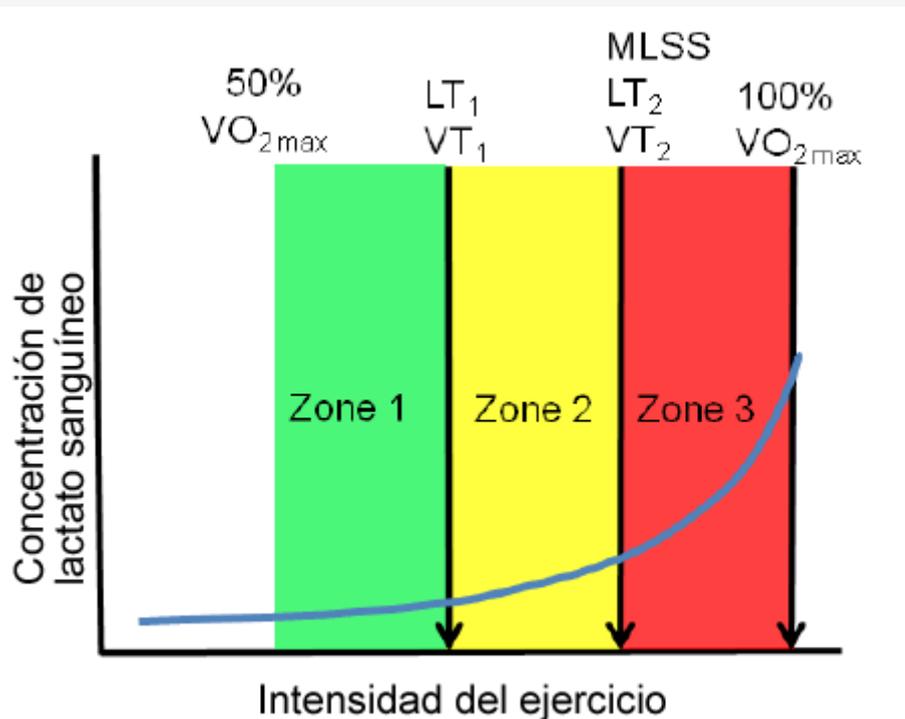
## Zonas de Intensidad de Entrenamiento

Para describir la distribución de intensidad en atletas de resistencia primero tenemos que acordar una escala de intensidad. Hay diferentes esquemas de zonas de intensidad para elegir. La mayoría de los cuerpos de dirigentes de los deportes nacionales emplean una escala de intensidad basada en los rangos de frecuencia cardíaca relativos a un intervalo de concentración de lactato sanguíneo máximo asociado. Los enfoques de las investigaciones varían, pero diferentes estudios de investigación recientes han identificado zonas de intensidad basadas en los umbrales ventilatorios. A continuación analizaremos un ejemplo de cada una de estas escalas.

La Tabla 1 presenta las escalas de intensidad que se utilizan en todos los deportes de resistencia en Noruega. Una crítica válida a esta escala es que no explica la variación individual en la relación entre la frecuencia cardíaca y el lactato sanguíneo, o la variación específica de la actividad, tal como la tendencia a que las concentraciones máximas de lactato sanguíneo en estado estable sean mas altas en actividades que activan menos masa muscular (Beneke y von Duvillard, 1996;Beneke et al., 2001).

**Tabla 1.** Escala típica de las cinco zonas para prescribir y supervisar el entrenamiento de atletas de resistencia. La escala de frecuencia cardíaca ha sido levemente simplificada en comparación con la escala real utilizada por la Federación Noruega de los Juegos Olímpicos, que se basa principalmente en décadas de evaluaciones de esquiadores de fondo, biatletas y remeros.

Zona de intensidad	VO <sub>2</sub> max. (%)	% Frecuencia cardíaca máx. (%)	Lactato (mmol/L)	Duración dentro de la zona
1	45-65	55-75	0,8-1,5	1-6 h
2	66-80	75-85	1,5-2,5	1-3 h
3	81-87	85-90	2,5-4	50-90 min
4	88-93	90-95	4-6	30-60 min
5	94-100	95-100	6-10	15-30 min



**Figura 1.** Tres zonas de intensidad definidas por la determinación fisiológica del primer y segundo umbral ventilatorio utilizando los equivalentes ventilatorios para O<sub>2</sub> (VT<sub>1</sub>) y CO<sub>2</sub> (VT<sub>2</sub>).

Diferentes estudios recientes analizaron la distribución de la intensidad del entrenamiento (Esteve-Lanao et al., 2005; Seiler y Kjerland, 2006; Zapico et al., 2007) o la distribución de intensidad de rendimiento en eventos de varios días (Lucía et al., 1999; Lucía et al., 2003) utilizaron el primer y segundo umbral ventilatorio para demarcar tres zonas de intensidad (Figura 1). La escala de 5 zonas presentada en la Tabla 1 y la escala de 3 zonas de la Figura 1 pueden ser razonablemente superpuestas porque la intensidad de la Zona 3 en el sistema de 5 zonas coincide bastante con la Zona 2 del modelo de 3 zonas. Aunque la definición de cinco zonas de intensidad "aeróbica" es probablemente informativo en la práctica del entrenamiento, es importante destacar que las mismas no se basan en marcadores fisiológicos claramente definidos. También es importante destacar que se definen típicamente 2-3 zonas adicionales para acomodar los entrenamientos de esprint de alta intensidad, de la capacidad aeróbica y de la fuerza. Estas zonas se definen típicamente como "Zonas anaeróbicas" o zonas 6, 7 y 8.

### Planes de Entrenamiento y Señalización celular

Los atletas no entrenan en la misma intensidad o con la misma duración todos los días. Estas variables se manejan día a día con metas implícitas para maximizar la capacidad fisiológica a lo largo del tiempo y permanecer saludables. De hecho, la primera es bastante dependiente de la última. La frecuencia de entrenamiento también es una variable crítica manejada por el atleta. Esto es particularmente evidente al comparar a los atletas más jóvenes (frecuentemente entrenan 5-8 veces

por semana) con los atletas más maduros que tienen un nivel de rendimiento máximo (frecuentemente entrenan 10-13 sesiones por semana). El aumento gradual de la frecuencia de entrenamiento (y no entrenar con sesiones de mayor duración) es el responsable de la mayoría de los incrementos en la cantidad de horas de entrenamientos anuales que se observan a medida que los atletas adolescentes maduran. El ciclismo podría ser una excepción a esta regla general, porque la tradición de ciclismo establece sesiones diarias únicas que a menudo tienen una duración de 4-6 h entre los profesionales. Los blancos finales del proceso de entrenamiento son las células individuales. Los cambios en las frecuencias de transcripción de ADN, traducción de ARN y finalmente, la síntesis de proteínas específicas o constelaciones de proteínas, son producidos a través de una cascada de señalización intracelular inducida por la sesión de entrenamiento. Los biólogos moleculares del ejercicio están desentrañando cómo el manejo de la intensidad y la duración del ejercicio modifica específicamente la señalización intracelular y las tasas de síntesis de proteínas resultantes a nivel celular o a nivel muscular/miocardio (Ahmetov y Rogozkin, 2009; Hoppeler et al., 2007; Joseph et al., 2006; Marcuello et al., 2005; McPhee et al., 2009; Yan, 2009). Aproximadamente 85% de todas las publicaciones que involucran expresión génica y ejercicio tienen menos de 10 años, por lo que todavía no sabemos lo suficiente para relacionar los resultados obtenidos mediante la técnica de *Western blot* con el entrenamiento específico de un atleta.

Es casi seguro que el impacto de la señalización de un determinado estrés físico (intensidad  $\times$  duración) disminuye con el entrenamiento (Hoppeler et al., 2007; Nordsborg et al., 2003). Por ejemplo, en sujetos desentrenados la actividad de la proteína quinasa  $\alpha 2$  (AMPK) activada por AMP aumenta 9 veces por encima de los niveles de descanso después de 120 min de ciclismo a 66 %  $VO_{2max}$ . Sin embargo, después de sólo 10 sesiones de entrenamiento, prácticamente no se observa ningún aumento en AMPK después de la misma serie de ejercicios (McConnell et al., 2005). El manejo de la intensidad y la duración del ejercicio también afecta las respuestas sistémicas de estrés asociadas al entrenamiento. Plantear esta conexión es más complicado dado que los recientes resultados sugieren que el agotamiento del glucógeno muscular puede aumentar las adaptaciones al entrenamiento y la suplementación con antioxidantes pueden inhibirlas (Brigelius-Flohe, 2009; Gómez-Cabrera et al., 2008; Hansen et al., 2005; Ristow et al., 2009; Yeo et al., 2008). Parece justo concluir que aunque nosotros sospechamos que existen diferencias importantes, todavía no podemos relacionar con detalle las variables de entrenamiento específicas (por ejemplo, 60 min contra 120 min a 70 %  $VO_{2max}$ ) con las diferencias en la señalización celular. Nuestra visión sobre el proceso de adaptación sigue siendo limitada a una escala mayor. Podemos identificar algunos potenciales factores de señalización que se asocian con una mayor intensidad del ejercicio durante una determinada duración (Tabla 2) o con una mayor duración en una determinada intensidad submáxima (Tabla 3). Algunos son potencialmente adaptativos y otros desadaptativos. Probablemente se produce un solapamiento sustancial de efectos entre extender la duración del ejercicio y aumentar la intensidad del mismo.

**Tabla 2.** Cambios fisiológicos importantes asociados con un aumento en la intensidad del ejercicio de 70% de  $VO_{2max}$  a  $\geq 90\%$   $VO_{2max}$  para una determinada duración de ejercicio. *a* Si el estiramiento del cardiomiocito induce señales intracelulares que conducen a la hipertrofia ventricular, entonces, tal vez es importante que el miocardio se estire más en los momentos de transición de trabajo a recuperación cuando la frecuencia cardíaca disminuye y el retorno venoso se mantiene transitoriamente elevado.

<b>Cambio inducido</b>	<b>Posible señal</b>	<b>Posible efecto positivo</b>	<b>Posible efecto negativo</b>
Mayor llenado diastólico y volumen diastólico final	Mayor estiramiento/carga de miofibrillas (Catalucci et al., 2008; Frank et al. 2008; Pelliccia et al., 1999; Sheikh et al. 2008) <sup>a</sup>	Mayor volumen sistólico máximo, adelgazamiento compensatorio de la pared ventricular	??
Mayor frecuencia cardíaca y presión sistólica intraventricular	Incremento del producto cardiovascular o doble producto (frecuencia cardíaca x presión arterial sistólica) y carga metabólica del miocardio (ver abajo)	Ninguno probablemente dado la capacidad oxidativa superior del músculo cardíaco	Ninguno probablemente dado la capacidad oxidativa superior del músculo cardíaco
Mayor número de fibras musculares activas (unidades motoras)	Mayor actividad metabólica en las unidades motoras rápidas (transducidas a través del Ca y de cambios en las concentraciones de fosfatos de alta energía? (Diaz y Moraes, 2008; Holloszy, 2008; Ojuka, 2004)	Mayor oxidación de grasas en el músculo entero/ desplazamiento hacia la derecha del umbral del lactato	Fatiga prematura y estímulo inadecuado de las unidades motoras de bajo umbral?
Expansión del lecho vascular a través de la activación de unidades motoras.	Señales mecánicas y metabólicas locales (Laughlin y Roseguini, 2008)	Mezcla de angiogénesis de arterias, capilares y venas, y alteración en el control de la resistencia vascular (Laughlin y Roseguini, 2008)	??
Aumento en la tasa glucolítica dentro de las fibras activas	Disminución del pH intracelular	Mayor capacidad buffer (Edge et al., 2006; Weston et al., 1997)	Fatiga prematura a nivel de las unidades motoras y menor estímulo para la síntesis de enzimas oxidativas.
Mayor activación simpática	Exposición celular a una mayor concentración sanguínea de adrenalina y noradrenalina (concentración x tiempo)	?	Recuperación agudamente retrasada del sistema nervioso autónomo (SNA) (Seiler et al., 2007); Regulación hacia la baja crónica de la sensibilidad de los receptores $\alpha$ y $\beta$ adrenérgicos si se repite excesivamente (Fry et al., 2006; Lehmann et al., 1997)

Aunque sea difícil de aceptar para algunos fisiólogos del ejercicio, los atletas y entrenadores no necesitan saber demasiada fisiología del ejercicio para entrenar eficazmente. Tienen que ser sensibles a cómo el manejo del entrenamiento afecta la salud del atleta, la tolerancia diaria al entrenamiento y al rendimiento, y hacer ajustes efectivos. A lo largo del tiempo, un atleta exitoso probablemente organizará su entrenamiento de determinada manera con el fin de maximizar los beneficios adaptativos para una carga determinada de estrés percibido. Es decir, nosotros podemos asumir que los atletas altamente exitosos integran esta experiencia de retroalimentación a lo largo del tiempo para maximizar los beneficios del entrenamiento y minimizar el riesgo de obtener resultados negativos tales como enfermedad, lesión, estancamiento o sobreentrenamiento.

**Tabla 3.** Cambios fisiológicos importantes asociados con el aumento en la duración del ejercicio de intensidad sub-máxima de 60-70 %  $VO_{2max}$  de 45 min a 120 min.

<b>Cambio Inducido</b>	<b>Posible señal</b>	<b>Efecto positivo posible</b>	<b>Efecto negativo posible</b>
Mayor número de repeticiones de movimientos	Mayor estímulo para la mielinización de las vías de los nervios motores activos (Fields, 2006; Ishibashi et al., 2006)	Mayor estabilidad técnica, economía de movimiento	Técnicamente desadaptativo si los patrones motores de la intensidad de la carrera son muy diferentes?
Aumento en la activación de unidades motoras rápidas debido a la fatiga de las unidades motoras (Kamo, 2002)	Mayor actividad metabólica en las unidades motoras rápidas (transducidas a través del Ca y de cambios en las concentraciones de fosfatos de alta energía? (Diaz y Moraes, 2008; Holloszy, 2008; Ojuka, 2004)	Aumento en la oxidación de grasas en el músculo entero/desplazamiento hacia la derecha en el umbral del lactato	??
Aumento en el agotamiento de glucógeno	??	Puede amplificar las señales para la síntesis de enzimas oxidativas específicas (Chakravarthy y Booth, 2004; Hansen et al., 2005)	Acumulación potencial de fatiga si los carbohidratos dietarios son insuficientes.
Mayor oxidación relativa de grasas	Gran incremento en la concentración plasmática de ácidos grasos libres.	Puede amplificar la señal para la biogénesis mitocondrial (Holloszy, 2008)	??

### **Intensidad del Entrenamiento de Atletas de Resistencia de Elite**

Las descripciones empíricas de la distribución real de la intensidad del entrenamiento en los atletas altamente entrenados han aparecido recientemente en la literatura. La primera vez que uno de nosotros (Seiler) dio una conferencia sobre el tema fue 1999, y había pocos datos concretos para presentar, pero gran cantidad de anécdotas y de conjeturas informadas. Carl Foster, Jack Daniels y Seiler publicaron un capítulo de un libro ese mismo año, "*Perspectives on Correct Approaches to Training* (Perspectivas sobre las metodologías correctas de entrenamiento)" que sintetizaba lo que nosotros conocíamos en ese momento (es posible leer el capítulo en Google Books). En ese momento, la mayor parte de la discusión e investigación relacionada al proceso de entrenamiento de resistencia se centraba en los factores asociados con el sobreentrenamiento (un desastre en el control del entrenamiento), con poco enfoque en lo que caracterizaba al "entrenamiento exitoso". La base empírica para describir la distribución de intensidad de entrenamiento exitosa es más fuerte luego de 10 años.

Robinson et al. (1991) publicó lo que según los autores era "el primer esfuerzo para cuantificar la intensidad de entrenamiento por medio del uso de "datos de entrenamiento longitudinales objetivos". Los autores estudiaron las características de entrenamiento de 13 varones de clase nacional, corredores de Nueva Zelanda con distancias que iban desde 1500 m hasta maratón. Los autores usaron datos de frecuencia cardíaca recolectados durante el entrenamiento y los relacionaron con los resultados de determinaciones estandarizadas de cinta rodante de frecuencia cardíaca y velocidad de carrera en una concentración de lactato sanguíneo de 4-mM (mal llamado umbral anaeróbico en ese momento). Durante un período de recolección de datos de 6-8 semanas que correspondía a la fase de preparación, estos atletas informaron que

sólo el 4% de todas las sesiones de entrenamiento fue entrenamientos intervalado o competencias. Durante las sesiones de entrenamiento restantes, la frecuencia cardíaca media fue solo 77% de sus frecuencias cardíacas en la concentración de lactato sanguíneo de 4 mM. Esta frecuencia cardíaca se traduce tal vez en 60-65% de  $VO_{2max}$ . Los autores concluyeron que mientras que los resultados de sus prueba fisiológicas eran similares a los obtenidos en estudios anteriores con corredores altamente entrenados, la intensidad de entrenamiento de estos corredores era quizás inferior a la óptima, en base a las recomendaciones predominantes de realizar la mayor parte del entrenamiento en, o alrededor del umbral del lactato/anaeróbico.

En una de las primeras cuantificaciones rigurosas de distribución de intensidad de entrenamiento informadas, Mujika et al. (1995) cuantificaron la distribución de intensidad de entrenamiento de nadadores de nivel nacional e internacional durante una temporada completa sobre la base de cinco zonas de concentración de lactato sanguíneo. A pesar de estar especializados en eventos de 100 m y 200 m que requieren ~60 a 120 s, estos atletas nadaron 77 % de los 1150 km recorridos durante una temporada en una intensidad por debajo de 2 mM de lactato sanguíneo. La distribución de la intensidad de los nadadores especialistas en 400 y 1500 m no se informó, pero probablemente se inclinó más hacia el nado de alto volumen y baja intensidad.

Billat et al. (2001) realizaron evaluaciones fisiológicas y extrajeron datos de los diarios de entrenamiento de maratonistas franceses y portugueses. Ellos clasificaron la intensidad del entrenamiento en términos de tres velocidades: maratón, 10 km, y 3 km. Durante las 12 semanas previas a las competencias de maratón olímpicas, los atletas de este estudio corrieron 78 % de sus kilómetros de entrenamiento por debajo de la velocidad de maratón, sólo 4% en velocidad de carrera de maratón (probablemente cercana al umbral ventilatorio 1 (VT1)), y 18% en velocidad de 10 km o 3 km (probablemente  $\geq$  VT2). Esta distribución de intensidad de entrenamiento fue idéntica en los atletas de alto nivel (<2h 16min para varones y <2h 38min para mujeres) y atletas de la clase más alta (<2 h 11 min y <2h 32min). Pero los atletas de la clase más alta corrieron una mayor cantidad de kilómetros totales y proporcionalmente una mayor distancia en la velocidad de 10km o por encima de ella.

Hay un mito sobre los corredores de Kenia por la intensidad alta de su entrenamiento. Es interesante que con los datos de otro estudio realizado por Billat et al. (2003), nosotros calculamos que corredores Keniatas de elite de 5km y 10 km tanto varones como mujeres, corrieron ~85% de sus kilómetros de entrenamiento semanales por debajo de la velocidad del umbral de lactato.

El primer estudio realizado para cuantificar la intensidad del entrenamiento con corredores donde se utilizaron tres zonas de intensidad fue el de Esteve-Lanao et al. (2005). Los autores siguieron el entrenamiento de ocho corredores de distancia españoles de nivel regional y nacional durante un período de seis meses dividido en ocho mesociclos de 3 semanas. Se midió la frecuencia cardíaca para cada sesión de entrenamiento para calcular el tiempo destinado a cada zona de frecuencia cardíaca definido a través de evaluaciones en cinta rodante. Afirmaron que habían cuantificado mas de 1000 grabaciones de frecuencia cardíaca. En promedio estos atletas corrieron 70 km/sem durante un período de seis meses, con 71 % de tiempo de carrera en la Zona 1, 21 % en la Zona 2 y 8 % en la Zona 3. La intensidad de entrenamiento media fue 64 % del  $VO_{2max}$ . Además informaron que los tiempos de rendimiento tanto en carreras largas como cortas, se correlacionaron de manera muy negativa con el tiempo total de entrenamiento en la Zona 1. No observaron ninguna correlación significativa entre la cantidad de entrenamiento de alta intensidad y el rendimiento en la carrera.

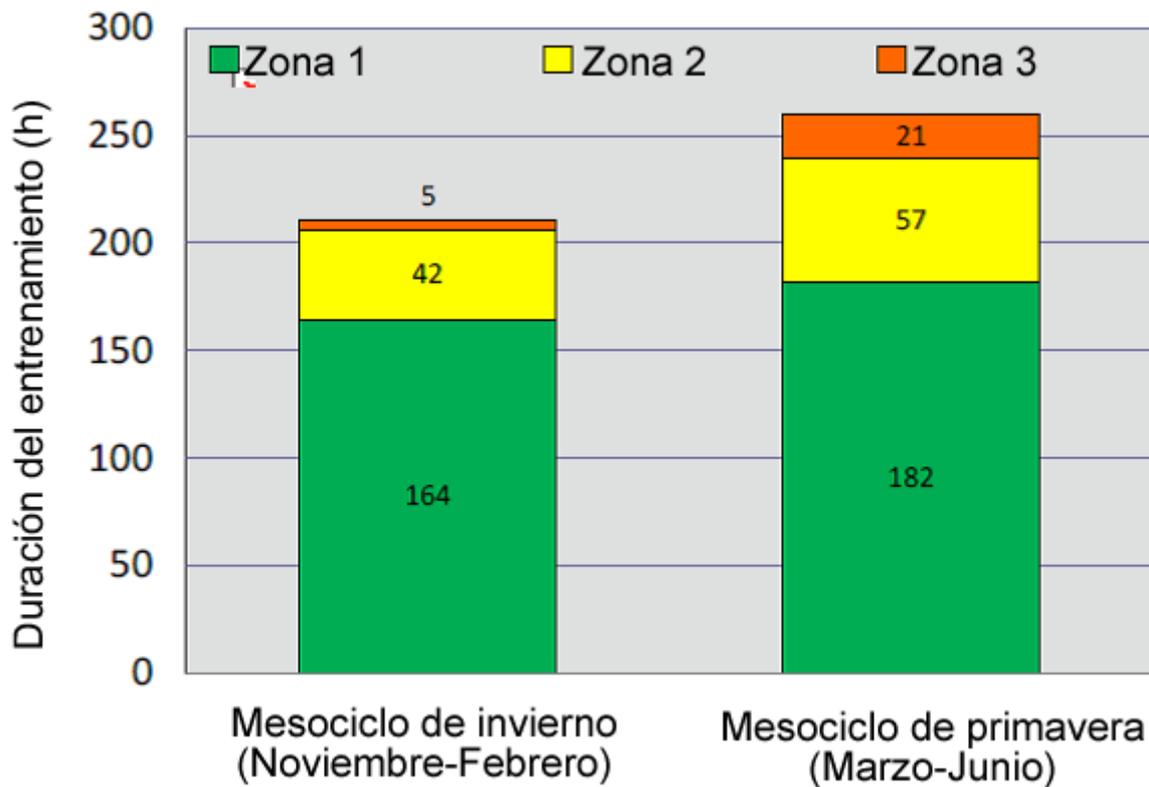
Los remeros que compiten en la distancia de 2000 m requieren 6-7 min. Steinacker et al. (1998) informaron que el entrenamiento de resistencia extenso (sesiones de 60 a 120 min a < 2 mM de lactato sanguíneo) predominaba en el volumen de entrenamiento de remeros de élite alemanes, dinamarqueses, holandeses, y noruegos. El remo en intensidades más altas abarcaba ~4-10% del tiempo total de remo. Los datos también sugirieron que remeros alemanes que se preparaban para los campeonatos mundiales no realizaban esencialmente nada de remo en la intensidad del *umbral*, pero en cambio o entrenaban por debajo de concentraciones sanguíneas de 2 mM o en intensidades que se encontraban entre 6-12 mM.

Seiler colaboró con Åke Fiskerstrand, entrenador y coordinador de desarrollo de talentos del equipo nacional de remo para analizar los antecedentes históricos de organización del entrenamiento de los remeros noruegos ganadores de medallas internacionales (Fiskerstrand y Seiler, 2004). Usando datos de encuestas, registros de entrenamientos de atletas y registros de estudios fisiológicos, los autores cuantificaron la distribución de intensidad de entrenamiento de 27 atletas que habían ganado medallas mundiales u olímpicas entre los años setenta y noventa. Pudieron comprobar que durante tres décadas: el volumen de entrenamiento había aumentado 20 % aproximadamente y predominaba el volumen de baja intensidad; la cantidad de horas mensuales de entrenamiento de alta intensidad había disminuido un tercio; el entrenamiento de esprint de intensidad muy alta y gran velocidad había disminuido dramáticamente a favor del entrenamiento con intervalos mas largos a 85-95% de  $VO_{2max}$ ; y aumentó marcadamente la cantidad de campamentos de altitud que realizaron los atletas. A lo largo de esta línea de tiempo de 30 años, el  $VO_{2max}$  y el rendimiento en ergómetros de remo aumentó ~10% y no se observaron variaciones en la talla o en la masa corporal. La mayoría de los cambios se

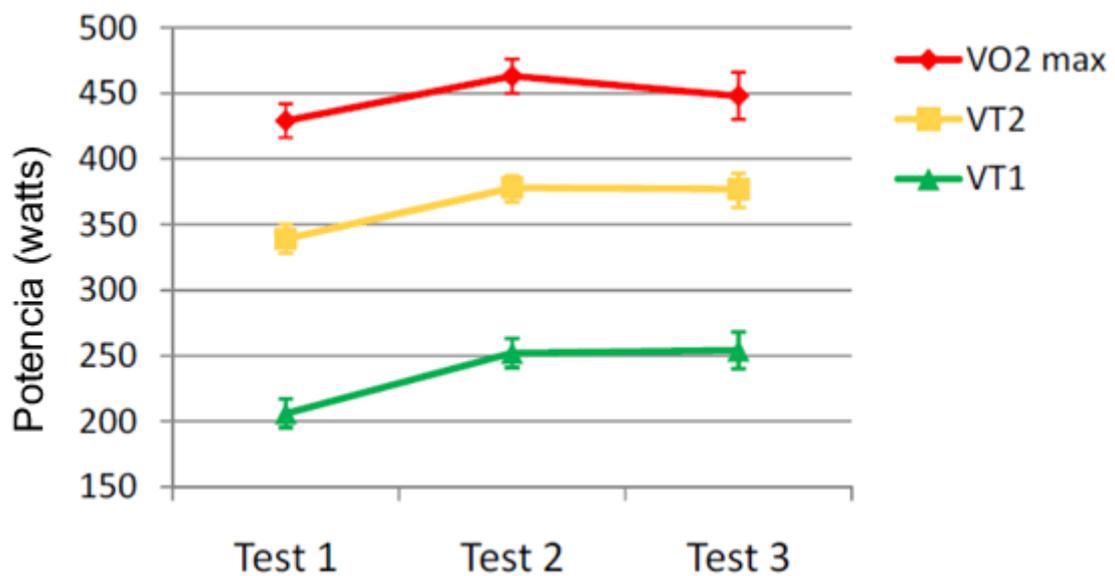
produjeron entre los años setenta y los ochenta, lo que coincidió con los mayores ajustes en la intensidad del entrenamiento.

Más recientemente, Gullich et al. (2009) describieron el entrenamiento de remeros junior de clase mundial de Alemania durante un período de 37 semanas que culminaba en los campeonatos nacionales y en las carreras de clasificación para los campeonatos mundiales. Eran remeros junior muy talentosos, y 27 de los 36 atletas obtuvieron medallas en los campeonatos mundiales para menores que se realizaron luego del período de estudio. Notablemente, 95% de su entrenamiento de remo se realizó por debajo de la concentración de lactato sanguíneo de 2 mM, sobre la base del monitoreo diario de la frecuencia cardíaca y de determinaciones en ergómetros de remo en el umbral, realizadas al comienzo de la temporada. Esta fuerte predominancia de entrenamiento de resistencia extenso se mantuvo en los mesociclos. Sin embargo, el volumen relativamente pequeño de trabajo en zona 2 y zona 3 cambió hacia intensidades más altas al ir de la fase de preparación básica hacia la fase de competición. Es decir, la distribución de intensidad se volvió más *polarizada*. Es importante señalar que la asignación del tiempo en zona en base a los puntos de corte de frecuencia cardíaca (el tipo de análisis realizado por los fabricantes del software para relojes de medición de frecuencia cardíaca) subestima el tiempo destinado a ejercicio de alta intensidad y el impacto de ese trabajo en la carga de estrés de una sesión de ejercicio (Seiler y Kjerland, 2006). Aunque los resultados están sesgados por este problema, aún existe un cambio claro en la distribución de intensidad hacia los volúmenes grandes de entrenamiento de intensidad baja a moderada. Nosotros también evaluamos retrospectivamente si existía alguna diferencia en las características del entrenamiento de los junior en un subgrupo de remeros donde algunos, luego de tres años, obtendrían medallas internacionales en la categoría senior (14 de 36 atletas) y los restantes atletas de la muestra continuaron compitiendo a nivel nacional. La única característica física o de entrenamiento que distinguió a los remeros más exitosos de sus pares fue una tendencia a distribuir su entrenamiento de un modo más polarizado; es decir, ellos realizaron una cantidad de remo significativamente mayor en intensidades aeróbicas muy bajas y en las intensidades más altas. Nosotros concluimos que la gran polarización observada podría deberse al mejor manejo de la intensidad (manteniendo el entrenamiento duro como duro y el entrenamiento fácil como fácil) de los atletas más exitosos. Esta polarización podría ejercer un efecto protector frente al estrés excesivo.

Se sabe que los ciclistas de ruta profesionales realizan volúmenes de entrenamiento muy altos, hasta de 35000 km por año. Zapico y colegas (2007) utilizaron el modelo de 3 zonas de intensidad para realizar un seguimiento de las características de entrenamiento de noviembre a junio de un grupo de ciclistas españoles de élite, menores de 23 años. Además, realizaron una evaluación fisiológica al comienzo de la temporada y al final de los mesociclos invernal y primaveral. Se observó un aumento en el volumen de entrenamiento total y un aumento de cuatro veces en el entrenamiento de la Zona 3 entre el mesociclo invernal y el primaveral (Figura 2), pero no se observaron aumentos adicionales en la potencia en VT1, VT2 o en  $VO_{2max}$  entre el fin de los mesociclos invernal y primaveral (Figura 3), a pesar de la intensificación del entrenamiento. Anecdóticamente, este hallazgo no es raro, a pesar de que los atletas se sienten más estrenados. Podría ser que la determinación de VT2 y de  $VO_{2max}$  por los métodos tradicionales puede pasar por alto un aumento importante en la *duración* que se puede mantener en las cargas de trabajo asociadas.



**Figura 2.** Intensidad y volumen del entrenamiento de ciclismo de ciclistas españoles de elite menores de 23 años realizado entre noviembre y junio. Datos obtenidos y vueltos a dibujar de Zapico et al., 2007).



**Figura 3.** Respuesta a la periodización de la intensidad y volumen de entrenamiento de ciclistas españoles de elite menores de 23 años. Resultados de los tests fisiológicos de pruebas realizadas antes de comenzar el mesociclo invernal (Test 1), al final del mesociclo invernal (Test 2), y al final del mesociclo primaveral (Test 3). Datos vueltos a dibujar de Zapico et al. (2007).

Los ciclistas individuales y de equipos de persecución compiten durante aprox. 4 min. El evento atrae a científicos del deporte porque la situación de rendimiento es muy controlada y manejable para plantear modelos exactos de las variables en ambos lados de la ecuación de equilibrio de potencia. Schumacher y Mueller (2002) demostraron la validez de esta metodología para predecir "estándares para medallas de oro" para realizar evaluaciones fisiológicas y de producción de potencia en el ciclismo de pista. Sin embargo, menos evidente a partir del título es la descripción detallada del programa de entrenamiento que siguieron los ciclistas alemanes supervisados en el estudio, que finalmente ganaron una medalla de oro en Sydney con record mundial. Estos atletas entrenaron para mantener 670 W en la posición de frente y ~450 W cuando iban a rueda utilizando un programa de entrenamiento donde predominaba el ciclismo de ruta continuo de intensidad baja a moderada (29-35000 km/año). En los 200 días previos a las Olimpiadas, los atletas realizaron entrenamiento "de gran cantidad de millas y de baja intensidad", a 50-60% de  $VO_{2max}$  en ~140 d. Las competencias de etapas insumieron otros 40 días aprox. El ciclismo de pista específico en intensidades cercanas a la de las competencias fue realizado en menos de 20 días entre marzo y septiembre. En los ~110 días previos a la final Olímpica, se realizó entrenamiento de pista de alta intensidad en sólo 6 días.

## REFERENCIAS

1. Aasen S. (2008). Utholdenhet- trening som gir resultater. *Akilles Forlag: Oslo, Norway*
2. Acevedo E., O., Goldfarb A.,H. (1989). Increased training intensity effects on plasma lactate, ventilatory threshold, and endurance. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 21, 563-568
3. Achten J., Jeukendrup A.E. (2003). Maximal fat oxidation during exercise in trained men. *International Journal of Sports Medicine* 24, 603-608
4. Ahmetov, II, Rogozkin V., A. (2009). Genes, Athlete Status and Training - An Overview. *Medicine and Sport Science* 54, 43-71
5. Åstrand I., Åstrand P., O., Christensen E., H., Hedman R. (1960). Intermittent muscular work. *Acta Physiologica Scandinavica*. 48, 448-453
6. Åstrand I. Å.P., Christiansen E.,H, Hedman R (1960). Myohemoglobin as an oxygen store in man. *Acta Physiologica Scandinavica* 48, 454-460
7. Åstrand P. O., Rodahl, K.R. (1986). Physical Training. In: *Textbook of Work Physiology*. McGraw-Hill: Singapore. 412-476
8. Beneke R., von Duvillard S.P. (1996). Determination of maximal lactate steady state response in selected sports events. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 28, 241-246
9. Beneke R., Leithauser R.M., Hutler M. (2001). Dependence of the maximal lactate steady state on the motor pattern of exercise. *British Journal of Sports Medicine*. 35, 192-196
10. Berger N.J., Tolfrey K., Williams A.G., Jones A.M. (2006). Influence of continuous and interval training on oxygen uptake on-kinetics. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 38, 504-512
11. Bhambhani Y., Singh M. (1985). The effects of three training intensities on  $VO_2$  max and  $VE/VO_2$  ratio. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences*. 10, 44-51
12. Billat V., Lepretre P.M., Heugas A.M., Laurence M.H., Salim D., Koralsztein J.P. (2003). Training and bioenergetic characteristics in elite male and female Kenyan runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 35, 297-304; discussion 305-296
13. Billat V.L., Flechet B., Petit B., Muriaux G., Koralsztein J.P. (1999). Interval training at  $VO_{2max}$ : effects on aerobic performance and overtraining markers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 31, 156-163
14. Billat V.L., Demarle A., Slawinski J., Paiva M., Koralsztein J.P. (2001). Physical and training characteristics of top-class marathon runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 33, 2089-2097
15. Brigelius-Flohe R. (2009). Commentary: oxidative stress reconsidered. *Genes and Nutrition*. 4, 161-163
16. Catalucci D., Latronico M.V., Ellingsen O., Condorelli G. (2008). Physiological myocardial hypertrophy: how and why? *Frontiers in Bioscience*. 13, 312-324
17. Chakravarthy M.V., Booth F.W. (2004). Eating, exercise, and "thrifty" genotypes: connecting the dots toward an evolutionary understanding of modern chronic diseases. *Journal of Applied Physiology*. 96, 3-10
18. Christensen E.H. (1960). [Interval work and interval training. J. *Internationale Zeitschrift fur Angewandte Physiologie Einschliesslich Arbeitsphysiologie*. 18, 345-356
19. Christensen E.H., Hedman R., Saltin B. (1960). Intermittant and continuous running. *Acta Physiologica Scandinavica*. 50, 269-286
20. Cunningham D.A., McCrimmon D., Vlach L.F. (1979). Cardiovascular response to interval and continuous training in women. *European Journal of Applied Physiology*. 41, 187-197
21. Daniels J., Scardina N. (1984). Interval training and performance. *Sports Medicine*. 1, 327-334
22. Daussin F.N., Ponsot E., Dufour S.P., Lonsdorfer-Wolf E., Doutreleau S., Geny B., Piquard F., Richard R. (2007). Improvement of  $VO_{2max}$  by cardiac output and oxygen extraction adaptation during intermittent versus continuous endurance training. *European Journal of Applied Physiology*. 101, 377-383
23. Daussin F.N., Zoll J., Dufour S.P., Ponsot E., Lonsdorfer-Wolf E., Doutreleau S., Mettauer B., Piquard F., Geny B., Richard R. (2008a). Effect of interval versus continuous training on cardiorespiratory and mitochondrial functions: relationship to aerobic performance improvements in sedentary subjects. *American Journal of Physiology*. 295, R264-272
24. Daussin F.N., Zoll J., Ponsot E., Dufour S.P., Doutreleau S., Lonsdorfer E., Ventura-Clapier R., Mettauer B., Piquard F., Geny B.,

- Richard R. (2008b). Training at high exercise intensity promotes qualitative adaptations of mitochondrial function in human skeletal muscle. *Journal of Applied Physiology*. 104, 1436-1441
25. Diaz F., Moraes C.T. (2008). Mitochondrial biogenesis and turnover. *Cell Calcium*. 44, 24-35
  26. Eddy D.O., Sparks K.L., Adelizi D.A. (1977). The effects of continuous and interval training in women and men. *European Journal of Applied Physiology*. 37, 83-92
  27. Edge J., Bishop D., Goodman C. (2006). The effects of training intensity on muscle buffer capacity in females. *European Journal of Applied Physiology*. 96, 97-105
  28. Esteve-Lanao J., San Juan A.F., Earnest C.P., Foster C., Lucia A. (2005). How do endurance runners actually train? Relationship with competition performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 37, 496-504
  29. Esteve-Lanao J., Foster C., Seiler S., Lucia A. (2007). Impact of training intensity distribution on performance in endurance athletes. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 21, 943-949
  30. Evertsen F., Medbo J.I., Jebens E., Nicolaysen K. (1997). Hard training for 5 mo increases Na(+)-K+ pump concentration in skeletal muscle of cross-country skiers. *American Journal of Physiology*. 272, R1417-1424
  31. Evertsen F., Medbo J.I., Jebens E., Gjovaag T.F. (1999). Effect of training on the activity of five muscle enzymes studied on elite cross-country skiers. *Acta Physiologica Scandinavica*. 167, 247-257
  32. Evertsen F., Medbo J.I., Bonen A. (2001). Effect of training intensity on muscle lactate transporters and lactate threshold of cross-country skiers. *Acta Physiologica Scandinavica*. 173, 195-205
  33. Fields R.D. (2006). Nerve impulses regulate myelination through purinergic signalling. *Novartis Foundation Symposium* 276, 148-158; discussion 158-161, 233-147, 275-181
  34. Fiskerstrand A, Seiler KS (2004). Training and performance characteristics among Norwegian international rowers 1970-2001. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*. 14, 303-310
  35. Foster C., Daines E., Hector L., Snyder A.C., Welsh R. (1996). Athletic performance in relation to training load. *Wisconsin Medical Journal*. 95, 370-374
  36. Foster C. (1998). Monitoring training in athletes with reference to overtraining syndrome. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 30, 1164-1168
  37. Foster C., Florhaug J.A., Franklin J., Gottschall L., Hrovatin L.A., Parker S., Doleshal P., Dodge C. (2001a). A new approach to monitoring exercise training. *Journal of Strength and Conditioning Research*. 15, 109-115
  38. Foster C, Heiman KM, Esten PL, Brice G, Porcari J (2001b). Differences in perceptions of training by coaches and athletes. *South African Journal of Sports Medicine* 8, 3-7
  39. Foster C., Hoyos J., Earnest C., Lucia A. (2005). Regulation of energy expenditure during prolonged athletic competition. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 37, 670-675
  40. Frank D., Kuhn C., Brors B., Hanselmann C., Ludde M., Katus H.A., Frey N. (2008). Gene expression pattern in biomechanically stretched cardiomyocytes: evidence for a stretch-specific gene program. *Hypertension*. 51, 309-318
  41. Fry A.C., Schilling B.K., Weiss L.W., Chiu L.Z. (2006). beta2-Adrenergic receptor downregulation and performance decrements during high-intensity resistance exercise overtraining. *Journal of Applied Physiology*. 101, 1664-1672
  42. Gaskill S.E., Serfass R.C., Bacharach D.W., Kelly J.M. (1999). Responses to training in cross-country skiers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 31, 1211-1217
  43. Gladden L.B. (2004). Lactate metabolism: a new paradigm for the third millennium. *Journal of Physiology*. 558, 5-30
  44. Gledhill N., Cox D., Jamnik R. (1994). Endurance athletes' stroke volume does not plateau: major advantage is diastolic function. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 26, 1116-1121
  45. Gomez-Cabrera M.C., Domenech E., Romagnoli M., Arduini A., Borrás C., Pallardo F.V., Sastre J., Vina J. (2008). Oral administration of vitamin C decreases muscle mitochondrial biogenesis and hampers training-induced adaptations in endurance performance. *American Journal of Clinical Nutrition*. 87, 142-149
  46. Gorostiaga E.M., Walter C.B., Foster C., Hickson R.C. (1991). Uniqueness of interval and continuous training at the same maintained exercise intensity. *European Journal of Applied Physiology*. 63, 101-107
  47. Gregory L.W. (1979). The development of aerobic capacity: a comparison of continuous and interval training. *Research Quarterly*. 50, 199-206
  48. Gullich A., Emrich E., Seiler S. (2009). Training methods and intensity distribution of young world-class rowers. *International Journal of Sport Physiology and Performance*. 4, In Press
  49. Halson S.L., Jeukendrup A.E. (2004). Does overtraining exist? An analysis of overreaching and overtraining research. *Sports Medicine*. 34, 967-981
  50. Hansen A.K., Fischer C.P., Plomgaard P., Andersen J.L., Saltin B., Pedersen B.K. (2005). Skeletal muscle adaptation: training twice every second day vs. training once daily. *Journal of Applied Physiology*. 98, 93-99
  51. Helgerud J., Hoydal K, Wang E., Karlsen T., Berg P., Bjerkaas M., Simonsen T., Helgesen C., Hjorth N., Bach R., Hoff J. (2007). Aerobic high-intensity intervals improve VO2max more than moderate training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 39, 665-671
  52. Henriksson J., Reitman J.S. (1976). Quantitative measures of enzyme activities in type I and type II muscle fibres of man after training. *Acta Physiologica Scandinavica*. 97, 392-397
  53. Hill A.V., Long C.N.H, Lupton H. (1924a). Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *Parts I-III*. . *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. 96, 438-475
  54. Hill AV, Long C.N.H., Lupton H. (1924b). Muscular exercise, lactic acid, and the supply and utilization of oxygen. *Parts IV-VI*. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*. 97, 84-138
  - Holloszy JO (2008). Regulation by exercise of skeletal muscle content of mitochondria and GLUT4. *Journal of Physiology and Pharmacology*. 59 Suppl 7, 5-18
  55. Hoppeler H, Klossner S, Fluck M (2007). Gene expression in working skeletal muscle. *Advances in Experimental Medicine and Biology* 618, 245-254
  56. Ingham S.A., Carter H., Whyte G.P., Doust J.H. (2008). Physiological and performance effects of low-versus mixed-intensity rowing

- training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 40, 579-584
57. Ishibashi T., Dakin K.A., Stevens B., Lee P.R., Kozlov S.V., Stewart C.L., Fields R.D. (2006). Astrocytes promote myelination in response to electrical impulses. *Neuron*. 49, 823-832
  58. Joseph A.M., Pilegaard H., Litvintsev A., Leick L., Hood D.A. (2006). Control of gene expression and mitochondrial biogenesis in the muscular adaptation to endurance exercise. *Essays in Biochemistry*. 42, 13-29
  59. Kamo M. (2002). Discharge behavior of motor units in knee extensors during the initial stage of constant-force isometric contraction at low force level. *European Journal of Applied Physiology*. 86, 375-381
  60. Laughlin M.H., Roseguini B. (2008). Mechanisms for exercise training-induced increases in skeletal muscle blood flow capacity: differences with interval sprint training versus aerobic endurance training. *Journal of Physiology and Pharmacology*. 59 Suppl 7, 71-88
  61. Lehmann M.J., Lormes W., Opitz-Gress A., Steinacker J.M., Netzer N., Foster C., Gastmann U. (1997). Training and overtraining: an overview and experimental results in endurance sports. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. 37, 7-17
  62. Lindsay F.H., Hawley J.A., Myburgh K.H., Schomer H.H., Noakes T.D., Dennis S.C. (1996). Improved athletic performance in highly trained cyclists after interval training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 28, 1427-1434
  63. Lucia A., Hoyos J., Carvajal A., Chicharro J.L. (1999). Heart rate response to professional road cycling: the Tour de France. *International Journal of Sports Medicine*. 20, 167-172
  64. Lucia A., Hoyos J., Santalla A., Earnest C., Chicharro J.L. (2003). Tour de France versus Vuelta a Espana: which is harder? *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 35, 872-878
  65. MacDougall D., Sale D. (1981). Continuous vs. interval training: a review for the athlete and the coach. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences*. 6, 93-97
  66. Marcuello A., Gonzalez-Alonso J., Calbet J.A., Damsgaard R., Lopez-Perez M.J., Diez-Sanchez C. (2005). Skeletal muscle mitochondrial DNA content in exercising humans. *Journal of Applied Physiology*. 99, 1372-1377
  67. McConell G.K., Lee-Young R.S., Chen Z.P., Stepto N.K., Huynh N.N., Stephens T.J., Canny B.J., Kemp B.E. (2005). Short-term exercise training in humans reduces AMPK signalling during prolonged exercise independent of muscle glycogen. *Journal of Physiology*. 568, 665-676
  68. McPhee J.S., Williams A.G., Stewart C., Baar K., Schindler J.P., Aldred S., Maffulli N., Sargeant A.J., Jones D.A. (2009). The training stimulus experienced by the leg muscles during cycling in humans. *Experimental Physiology*. 94, 684-694
  69. Mujika I., Chatard J.C., Busso T., Geysant A., Barale F., Lacoste L. (1995). Effects of training on performance in competitive swimming. *Canadian Journal of Applied Physiology*. 20, 395-406
  70. Nordsborg N., Bangsbo J., Pilegaard H. (2003). Effect of high-intensity training on exercise-induced gene expression specific to ion homeostasis and metabolism. *Journal of Applied Physiology*. 95, 1201-1206
  71. Ojuka E.O. (2004). Role of calcium and AMP kinase in the regulation of mitochondrial biogenesis and GLUT4 levels in muscle. *Proceedings of the Nutrition Society*. 63, 275-278
  72. Overend T.J., Paterson D.H., Cunningham D.A. (1992). The effect of interval and continuous training on the aerobic parameters. *Canadian Journal of Sport Sciences*. 17, 129-134
  73. Pelliccia A., Culasso F., Di Paolo F.M., Maron B.J. (1999). Physiologic left ventricular cavity dilatation in elite athletes. *Annals of Internal Medicine*. 130, 23-31
  74. Poole D.C., Gaesser G.A. (1985). Response of ventilatory and lactate thresholds to continuous and interval training. *Journal of Applied Physiology*. 58, 1115-1121
  75. Ristow M., Zarse K., Oberbach A., Kloting N., Birringer M., Kiehnopf M., Stumvoll M., Kahn C.R., Bluher M. (2009). Antioxidants prevent health-promoting effects of physical exercise in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 106, 8665-8670
  76. Robinson D.M., Robinson S.M., Hume P.A., Hopkins W.G. (1991). Training intensity of elite male distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 23, 1078-1082
  77. Saltin B., Nazar K., Costill D.L., Stein E., Jansson E., Essen B., Gollnick D. (1976). The nature of the training response; peripheral and central adaptations of one-legged exercise. *Acta Physiologica Scandinavica*. 96, 289-305
  78. Schumacher Y.O., Mueller P. (2002). The 4000-m team pursuit cycling world record: theoretical and practical aspects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 34, 1029-1036
  79. Seiler K.S., Kjerland G.O. (2006). Quantifying training intensity distribution in elite endurance athletes: is there evidence for an "optimal" distribution? *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*. 16, 49-56
  80. Seiler S., Sjursen J.E. (2004). Effect of work duration on physiological and rating scale of perceived exertion responses during self-paced interval training. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*. 14, 318-325
  81. Seiler S., Hetlelid K.J. (2005). The impact of rest duration on work intensity and RPE during interval training. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 37, 1601-1607
  82. Seiler S., Haugen O., Kuffel E. (2007). Autonomic recovery after exercise in trained athletes: intensity and duration effects. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 39, 1366-1373
  83. Sheikh F., Raskin A., Chu P.H., Lange S., Domenighetti A.A., Zheng M., Liang X., Zhang T., Yajima T., Gu Y, Dalton N.D., Mahata S.K., Dorn G.W., 2nd, Heller-Brown J, Peterson KL, Omens JH, McCulloch AD, Chen J (2008). An FHL1-containing complex within the cardiomyocyte sarcomere mediates hypertrophic biomechanical stress responses in mice. *Journal of Clinical Investigation*. 118, 3870-3880
  84. Steinacker J.M., Lormes W., Lehmann M., Altenburg D. (1998). Training of rowers before world championships. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 30, 1158-1163
  85. Stepto N.K., Hawley J.A., Dennis S.C., Hopkins W.G. (1999). Effects of different interval-training programs on cycling time-trial performance. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 31, 736-741
  86. Talanian J.L., Galloway S.D., Heigenhauser G.J., Bonen A., Spriet L.L. (2007). Two weeks of high-intensity aerobic interval training increases the capacity for fat oxidation during exercise in women. *Journal of Applied Physiology*. 102, 1439-1447

87. Thompson P. (2005). Break through the speed barrier with the "new interval training". *Athletics Weekly*. 59, 62-63
88. Wenger H.A., Macnab R.B. (1975). Endurance training: the effects of intensity, total work, duration and initial fitness. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. 15, 199-211
89. Weston A.R., Myburgh K.H., Lindsay F.H., Dennis S.C., Noakes T.D., Hawley J.A. (1997). Skeletal muscle buffering capacity and endurance performance after high-intensity interval training by well-trained cyclists. *European Journal of Applied Physiology*. 75, 7-13
90. Wisloff U., Stoylen A., Loennechen J.P., Bruvold M., Rognum O., Haram P.M., Tjonna A.E., Helgerud J., Slordahl S.A., Lee S.J., Videm V., Bye A., Smith G.L., Najjar S.M., Ellingsen O., Skjaerpe T. (2007). Superior cardiovascular effect of aerobic interval training versus moderate continuous training in heart failure patients: a randomized study. *Circulation*. 115, 3086-3094
91. Yan Z. (2009). Exercise, PGC-1alpha, and metabolic adaptation in skeletal muscle. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism*. 34, 424-427
92. Yeo W.K., Paton C.D., Garnham A.P., Burke L.M., Carey A.L., Hawley J.A. (2008). Skeletal muscle adaptation and performance responses to once a day versus twice every second day endurance training regimens. *Journal of Applied Physiology*. 105, 1462-1470
93. Zapico A.G., Calderon F.J., Benito P.J., Gonzalez C.B., Parisi A., Pigozzi F., Di Salvo V. (2007). Evolution of physiological and haematological parameters with training load in elite male road cyclists: a longitudinal study. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*. 47, 191-196
94. Zhou B., Conlee R.K., Jensen R., Fellingham G.W, George JD, Fisher AG (2001). Stroke volume does not plateau during graded exercise in elite male distance runners. *Medicine and Science in Sports and Exercise*. 33, 1849-1854