**UTILIZACIÓN DEL GLUCÓGENO MUSCULAR**

**La producción de adenosín trisfosfato (ATP) durante el esfuerzo muscular intenso depende de la disponibilidad de glucógeno muscular y de glucosa sanguínea. A pesar de que es posible realizar esfuerzos leves con bajos niveles de los CHO mencionados, la depleción de estos combustibles hace que sea imposible que los músculos alcancen los requerimientos de ATP y que mantengan la tensión contráctil necesaria para el rendimiento deportivo (36, 71, 130). Si bien las grasas y las proteínas contribuyen al “pool” energético utilizado durante la actividad muscular, estas fuentes, por si solas, no pueden respaldar las demandas del músculo ante el ejercicio agudo e intenso. La oxidación de grasas durante el ejercicio intenso depende de la producción de intermediarios en el ciclo de Krebs (e.g., citrato) durante la ruptura de CHO. Por lo tanto, cuando hay una depleción glucogénica en los músculos, las fibras no pueden producir suficientes cantidades de estos metabolitos intermediarios para apoyar al metabolismo de las grasas. Aún con adecuadas cantidades de glucógeno muscular las demandas de proteínas y grasas son menores. Se ha calculado que aún en una maratón, menos del 1% de las reservas orgánicas totales de grasas y proteínas pueden ser oxidadas, mientras que en mismo tiempo de esfuerzo se puede producir una depleción glucogénica total en el hígado y en los músculos utilizados durante la actividad (27). Al comienzo del ejercicio, el glucógeno muscular es la principal fuente de CHO utilizada para generar energía. Esta evidencia se ilustra en la Fig. 1, que muestra la rápida disminución del glucógeno muscular durante los primeros minutos, en una prueba de 3 horas sobre la cinta ergométrica.A pesar de que el test se realizó a una intensidad constante, la tasa de glucógeno utilizado por el músculo gemelo fue mayor durante los primeros 90 minutos de ejercicio (la mitad del tiempo).**

**De allí en adelante el uso de glucógeno se hizo más lento, a medida que se vacilaban las reservas. El sujeto sintió solamente un malestar moderado durante la primera parte de la carrera, cuando la tasa de uso de glucógeno muscular era rápida. Sólo cuando el glucógeno muscular estaba casi depletado, el sujeto experimentó una fatiga severa**

****

**Contenido de glucógeno muscular y tasa subjetiva de percepción de esfuerzo (escala de Borg), durante una carrera en cinta ergométrica de tres horas de duración. Notar que durante la primera mitad del ejercicio (90´) el glucógeno fue utilizado a una tasa mayor que durante los 90 minutos finales del mismo. La tasa de depleción del glucógeno muscular depende del número de factores que incluyen la intensidad del ejercicio, la condición física, la modalidad del ejercicio, la temperatura ambiente, y la dieta pre-ejercicio (16, 22). Cuando el flujo de oxígeno a los músculos en ejercicio no cubre en forma adecuada las demandas para el metabolismo oxidativo, hay una mayor dependencia del CHO para producir energía. Se ha demostrado que existe una relación exponencial entre la tasa de utilización del glucógeno muscular y la intensidad del ejercicio (%VO2 máx.). Este punto está ilustrado en la Fig.2. Cuando se camina al 20% - 30% del VO2 máx., se oxida muy poco glucógeno muscular (0,3 mmol/kg x min-1), mientras que contracciones máximas repetidas pueden elevar la velocidad de uso de glucógeno a más de 40 mmol/kg x min-¹.Es difícil predecir en forma exacta el grado de vaciamiento del glucógeno muscular durante series de ejercicio de diferentes duraciones.**

**Por ejemplo, 2 horas de ciclismo al 30% del VO2 máx. sólo reducirá el glucógeno muscular en un 20%, mientras que si el ejercicio se realiza al 75% del VO2 máx. se producirá una depleción casi total (69,85). Estos resultados demuestran que hay un marcado incremento en el uso del glucógeno muscular cuando la intensidad del esfuerzo se acerca a niveles máximos y/o supra máximos.**

 ****

**Efectos de la velocidad de carrera sobre la tasa de utilización del glucógeno muscular. La misma puede ser 40 veces más rápida durante una carrera de alta velocidad, comparado a los valores durante una caminata (29).Los primeros estudios realizados por Christensen y Hanssen (22) mostraron que a niveles de ejercicio por debajo del 95% del VO2 máx. Del corredor, tanto los CHO como las grasas son utilizados como combustible. Sin embargo, por encima de esta intensidad, los CHO son utilizados casi con exclusividad; por lo tanto, una intensidad elevada en la primera fase de una serie de ejercicios puede llevar a la depleción glucogénica y a la fatiga prematura. Cuando los niveles de glucógeno muscular son muy bajos, se debe reducir la intensidad del ejercicio a fin de disminuir las demandas de CHO, permitiendo que de esta manera que los músculos utilicen más las grasas (11, 12, 36).El ejercicio realizado a altas temperaturas también puede aumentar las demandas de CHO. Fink y cols. (55) han demostrado un aumento del 76% en el uso de glucógeno muscular durante 75 minutos de ejercicio en comparación con un ejercicio similar realizado en un clima más frío (temp. = 9ªC; humedad = 55%). Este aumento en la dependencia del glucógeno muscular parece estar causado por una reducción en el flujo sanguíneo muscular, y a la vez, por un incremento en la temperatura intramuscular. Por lo tanto, es aparente que una cantidad de factores ambientales también podría influenciar la tasa de uso de CHO durante el ejercicio. También se debería mencionar que las demandas de glucógeno muscular no son compartidas de igual manera por todas las fibras de un músculo en ejercicio. Los músculos del ser humano están compuestos por, al menos, dos tipos diferentes de fibras musculares. A aquellas que tienen una alta capacidad oxidativa y que son relativamente lentas para contraerse, se las conoce como fibras de tipo Y. Las fibras de tipo II tienen una baja capacidad para el metabolismo oxidativo, un alto potencial glucolítico, y son más veloces para contraerse. Existen dos subgrupos de fibras de tipo II, de las cuales las de tipo IIa parecen ser más comúnmente reclutadas, en contraposición con las del tipo IIb que son menos usadas.**

**El patrón de depleción del glucógeno de las fibras I y II depende de la intensidad del ejercicio. Durante el ejercicio prolongado con una intensidad menor al 70% del VO2 máx., la depleción glucogénica es mayor en las fibras de tipo I, lo que sugiere que estas fibras tienen la gran responsabilidad del desarrollo de la tensión en tales actividades (36, 62, 128).A medida que aumentan los requerimientos de tensión, se agregan al trabajo las fibras de tipo IIa y, finalmente, las de tipo IIb. Durante una contracción máxima, el sistema nervioso intenta reclutar todos los tipos de fibras. Con las intensidades más altas de esfuerzo (75%-90% VO2 máx.), son frecuentemente reclutadas las fibras de tipo II, y su glucógeno es depletado a una tasa mayor que las fibras de tipo I. Esto no se debería interpretar como que las fibras de tipo I son menos usadas que las de tipo II durante contracciones máximas; simplemente reflejas la mayor capacidad glucolítica y la mayor dependencia del glucógeno que tienen las fibras de tipo II. En realidad, durante las contracciones musculares de alta intensidad todas las fibras musculares son reclutadas. En la Fig.3 se ilustra la distribución del glucógeno muscular usado por las fibras de tipo IIa, y IIb de los músculos del muslo durante el ciclismo. Cuando el glucógeno es depletado en las fibras de tipo I, las fibras de tipo II parecen no ser capaces de generar una tensión suficiente y/o no pueden ser fácilmente reclutadas para compensar la pérdida en la tensión muscular. Ha surgido la teoría que las sensaciones de fatiga muscular y la pesadez que ocurren durante un ejercicio de larga duración, reflejan la incapacidad de algunas fibras químicas musculares de responder a las demandas del ejercicio y mantener su tensión.**

****

**Distribución de glucógeno muscular utilizado por las figuras de tipo I, IIa, y IIb, en el vasto lateral del muslo, durante ciclismo a varias intensidades. Además de depletar selectivamente el glucógeno de las fibras de tipo I y II, el ejercicio puede exigir una demanda inusualmente intensa en grupos musculares selectos. Por ejemplo, durante una carrera de 2 horas en cinta ergométrica, con carrera cuesta arriba, cuesta abajo, y sin inclinación, se utilizaron mayores cantidades de glucógeno del gemelo y del sóleo que del vasto lateral.**

**RESERVAS DE GLUCÓGENO Y RENDIMIENTO**

**En el ser humano, la reserva del glucógeno hepático y muscular depende, casi exclusivamente, del consumo de CHO a través de la alimentación. Como se mencionó anteriormente, durante períodos de ejercicio prolongado y durante el ayuno, el hígado moviliza sus reservas a fin de mantener la glucosa sanguínea. Como consecuencia de un ejercicio intenso de 60 minutos de duración, se observó que el glucógeno hepático disminuye un 55% (de 244 a 111 mmol/kg de tejido) (70). Los estudios han demostrado que las reservas de glucógeno hepático disminuirán rápidamente si a un individuo en reposo se le niegan los CHO por sólo 24 horas. En combinación con dietas bajas en CHO, un entretenimiento intenso puede vaciar las reservas de glucógeno hepático. Al contrario de algunos animales, el hombre es incapaz de generar una cantidad significativa de glucógeno muscular o hepático por gluconeogénesis. La rata, por ejemplo, puede usar varios precursores (e.g., glicerol, lactato, etc.) para resintetizar glucógeno hepático, aún cuando no consuma alimentos. Los humanos, sin embargo, deben depender de la ingesta de CHO para reponer estas reservas. Se ha mostrado que una simple ingesta de CHO puede llevar rápidamente el glucógeno hepático a niveles normales (70).La cantidad de glucógeno muscular almacenado es regulado por el nivel de actividad del individuo, por su estado de entrenamiento, y por el contenido de CHO en la alimentación.**

**Se ha observado que los sujetos desentrenados, que están en reposo y están bien alimentados, poseen valores de glucógeno muscular que varían entre 70 y 110 Mmol unidades de glucosyl/kg de peso húmedo (16,72). Por otro lado, los atletas entrenados en resistencia tienen valores de glucógeno muscular entre 140 y más de 230 mmol/kg de peso húmedo (72, 104, 124). Los mayores niveles de glucógeno muscular observados en individuos entrenados parecen estar causados por la influencia combinada del ejercicio crónico, la depleción glucogénica, y la curva de supercompensación por la ingesta de CHO. La enzima clave en la regulación de la reserva glucogénica en el músculo es la glucógeno sintetasa (glucosa-UPD: a-4-glucosil-trasferasa; EC 2.4.1.11). Esta enzima existe en dos formas, una dependiente de glucosa (6-P (forma D), y otra independiente de glucosa 6-P (forma I). En el extracto crudo del músculo la transformación de I a D ocurre en presencia de ATP y magnesio (60). Una variedad de factores hormonales y no hormonales influyen en la actividad de esta enzima. En los trabajos realizados por Adolfsson y Ahren (3), y Larner y cols. (93), se puede observar una revisión detallada del sistema de la enzima glucógeno sintetasa. En un grupo de sujetos normales (72) se observó una relación inversa (r= -0,88) entre el contenido de glucógeno muscular y la actividad de la sintetasa I, en porcentaje de actividad total. Consecuentemente, cuando el glucógeno muscular es depletado al final del ejercicio, la actividad de la sintetasa I muestra un dramático aumento. Esta enzima es, además activada por la infusión de insulina y/o glucosa; por lo cual, no es sorprendente que estimule una rápida resíntesis del glucógeno muscular luego del ejercicio, cuando se ingieren CHO. La tasa más alta de resíntesis del glucógeno muscular (0,4 a 0,5 Mmol de unidades de glucosyl/kg/min) se produce en el músculo depletado de glucógeno durante la infusión de glucosa. En la sección 10 de este artículo se discutirá en detalle la influencia de los CHO específicos en los alimentos, sobre la tasa y cantidad de reserva de glucógeno muscular. Como se observó previamente, la degradación de glucógeno muscular durante series prolongadas de ejercicios de resistencia es más rápida en los primeros minutos de la activad; luego se hace más lenta durante las últimas etapas de la misma. Además, hay un marcado incremento en el uso de glucógeno muscular cuando la intensidad del esfuerzo se acerca a niveles máximos y/o supramáximos.**

**CONTRIBUCIONES DE LA GLUCOSA SANGUÍNEA AL METABOLISMO MUSCULAR**

**La glucosa sanguínea también sirve como principal contribuyente para el “pool” de sustratos metabólicos para la actividad muscular. Durante el reposo, el consumo de glucosa que hace el músculo, es menor al 10% del consumo total de oxígeno del músculo (7). Sin embargo, durante una carga de ciclismo, moderada a intensa, el consumo neto de glucosa de los músculos de la pierna aumenta de 10 a 20 veces por encima del valor de reposo (132). Durante las últimas etapas de un ejercicio prolongado, la fracción de energía derivada de la glucosa sanguínea aumenta, y puede ser responsable del 75% -90% del metabolismo de CHO del músculo (132). Este gran drenaje de la glucosa sanguínea necesita un concomitante aumento en la producción de glucosa hepática, para demorar la aparición de la hipoglucemia por esfuerzo. Debido a que el hígado es el principal contribuyente de glucosa a la sangre, el aumento de las demandas impuestas por la actividad muscular resulta en una rápida disminución del glucógeno hepático, y en una mayor dependencia en la gluconeogénesis. Se ha demostrado que durante 4 horas de ejercicio moderado, el glucógeno hepático puede ser depletado en un 75% con un aumento en la producción de glucosa, a partir de precursores tales como el lactato, piruvato, glicerol y aminoácidos glucogénicos (51, 131). A pesar de estos mecanismos para aumentar la producción y liberación de glucosa, a medida que el ejercicio continúa por más de 40-60 minutos, se puede producir un desbalance entre la producción hepática y la utilización periférica de glucosa (130). Por lo tanto, los atletas que compiten en eventos que duran 3 horas o más, pueden volverse hipoglucémicos; los valores de glucosa sanguínea alcanzan valores menores a 2,5 mmol/l (95).A pesar de que hay una información limitada acercada de la depleción de glucógeno hepático durante el ejercicio en humanos (70), los estudios con ratas han demostrado que el entrenamiento de resistencia aumenta el contenido hepático en reposo en un 70% de 42,3 (SE ± 6,6) a 72,1 (SE ± 5,0) mg/g de peso húmedo (9). Además, las tasas de depleción del glucógeno hepático durante el ejercicio fueron menores en ratas entrenadas que en no entrenadas. Al final de 45´ de carrera, la concentración de glucógeno en el hígado de los animales entrenados disminuyó un 28%, en comparación con la reducción del 93% observada en ratas no entrenadas (9). Es difícil explicar por qué hay diferencias en los valores de glucógeno hepático entre los animales entrenados y no entrenados. La tasa más lenta de glucógeno hepático utilizada por las ratas entrenadas puede ser el resultado de un menor incremento en los niveles de dicha hormona circulante y una mejor capacidad gluconeogénica del hígado en los animales entrenados (9,67). También es posible que estos animales experimenten una menor reducción en el flujo sanguíneo hepático durante el ejercicio que las ratas desentrenadas**

**REQUERIMIENTOS DE CALORÍAS Y DE CARBOHIDRATOS DE LOS DEPORTES**

**Sólo se posee de una información limitada para describir el gasto real de CHO durante las actividades deportivas. Los requerimientos técnicos para que sean precisas las mediciones fuera del laboratorio son difíciles y, a menudo, poco prácticos. La información que se brinda es esta sección del artículo se limita a nuestros estudios realizados con corredores y nadadores competitivos, los cuales se hicieron durante sesiones de atletismo y en pileta de natación. A pesar de que esta visión de las demandas energéticas para deportistas competitivos es limitada, nos brinda alguna indicación sobre las demandas totales de calorías y de CHO que tienen la mayoría de los atletas, que entrenan en forma diaria e intensa durante varias horas. El entrenamiento para deportes competitivos puede aumentar el gasto energético diario en un 25%-50%. Los corredores de larga distancia, por ejemplo, comúnmente corren entre 15-40 km/día con un promedio de gasto de 55-64 Kcal/km (26, 30, 82). Por lo tanto, estos corredores pueden gastar entre 900 y 2400 Kcal/día durante el entrenamiento. El gasto energético en otras actividades, tales como el ciclismo, difiere de lo observado en el pedestrismo. El gasto energético en el ciclismo aumenta aproximadamente en relación al cuadrado de la velocidad, y no en relación cúbica con la misma, como uno podría esperar (125). Esto se debe a la contribución variada de la resistencia de pedaleo a la resistencia total del ciclista y la bicicleta, a diferentes velocidades. El costo energético de una carrera de ciclismo puede ser estimado a partir de un ejemplo de una carrera de 160 km, realizada a un promedio de velocidad de 40 km por hora (km/h).El costo energético para tal esfuerzo es, aproximadamente, de 28,6 Kcal/km, o cerca de 1170 Kcal/h, a un costo total de 4680 Kcal. Esto sugiere que ciclistas con entrenamientos intensos pueden gastar un promedio de 6000 Kcal/día (125). Los extremos superiores del gasto energético para ciclistas competitivos entrenados, que recorrieron 540 km en 19,3 horas están estimados entre 9500-13850 Kcal (83).En cuanto al entrenamiento de los nadadores, se han reportado distancias de 5 15 km/día. Debido a que su nivel de habilidad, estilo de nado, flotabilidad, y resistencia de fricción acuática influye en el costo energético, es difícil estimar el costo calórico preciso de entrenamiento para este deporte (33,82). Los estudios en nadadores muy hábiles han mostrado que se gastan, aproximadamente 250 Kcal/km con el estilo libre, una de las formas más económicas de natación (33,48).**

****