Monograph

Resíntesis de Glucógeno Post-Ejercicio: Efecto de la Ingesta de Carbohidratos

John L Ivy[1]

[1]*Exercise Physiology and Metabolism Laboratory, Department of Kinesiology and Health Education, University of Texas at Austin, Texas 78712.*

RESUMEN

Para maximizar la resíntesis de glucógeno luego del ejercicio, se debería consumir un suplemento con carbohidratos que exceda de 1.0 gr/kg de peso corporal, inmediatamente después de la competencia o del entrenamiento. La continuación de la suplementación cada dos horas mantendrá una rápida tasa de almacenamiento, hasta más de seis horas post-ejercicio. Los suplementos compuestos de glucosa o polímeros de glucosa son los más efectivos para la restitución del glucógeno hepático. La adición de proteínas al suplemento de carbohidratos también puede incrementar la tasa de almacenamiento de glucógeno debido a la capacidad de las proteínas y carbohidratos para actuar sinérgicamente sobre la secreción de insulina.

Palabras Clave: fructosa, glucosa, insulina, proteína

INTRODUCCION

Está bien establecido que el glucógeno muscular es una fuente esencial de energía durante el ejercicio prolongado intenso. En relación con esto, se ha demostrado que la percepción de la fatiga es paralela a la declinación en la concentración del glucógeno muscular, que la resistencia aeróbica está relacionada con los depósitos pre-ejercicio de glucógeno muscular, y que el incremento en la resistencia aeróbica, luego del entrenamiento, está parcialmente relacionado al incremento en la capacidad de almacenamiento de glucógeno muscular. Debido a que la capacidad de resistencia aeróbica está estrechamente ligada a la concentración de glucógeno muscular, su regulación ha sido extensivamente investigada. En el clásico estudio de investigación llevado a cabo por Bergström y Hultman en 1967 (1) se descubrió que la síntesis de glucógeno se produjo más rápidamente en el músculo depletado en sus depósitos de glucógeno. Estos investigadores también hallaron que el consumo de una dieta alta en carbohidratos luego del ejercicio podría restituir los depósitos de glucógeno dentro de un período de 24 hs, y que si la dieta era continuada por tres días, la concentración de glucógeno muscular podría incrementarse por encima del nivel normal, pero solo en el músculo previamente ejercitado. Una investigación subsiguiente demostró que luego de la depleción del glucógeno muscular por el ejercicio, se requirió el consumo de 500-600 gr de carbohidratos para que el glucógeno muscular sea resintetizado a la concentración pre-ejercicio dentro de un período de 24 hs. Se observó que el consumo de más de 600 gr de carbohidratos por día, no tiene beneficio adicional. También se obtuvo evidencia de que cuando la concentración de carbohidratos de la dieta era inadecuada, en los días sucesivos de ejercicio prolongado intenso, se produjo una reducción gradual de los depósitos de glucógeno muscular y un deterioro en el rendimiento (3).

Aunque se han definido métodos para incrementar el glucógeno muscular por sobre los niveles normales, en preparación para la competición, aun contando con niveles normales de glucógeno sobre una base diaria, estos procedimientos no están dirigidos a solucionar el problema de las competiciones deportivas que requieren una rápida resíntesis de glucógeno muscular dentro de horas. Si bien es improbable que los depósitos de glucógeno muscular pudiesen ser completamente resintetizados en muy pocas horas mediante la suplementación nutricional por si sola, sería beneficioso para el atleta si los procedimientos de suplementación que maximizan la tasa de almacenamiento de glucógeno muscular post-ejercicio estuviesen definidos. Esta revisión, por lo tanto, se centrará en la suplementación nutricional para la rápida resíntesis de glucógeno muscular, inmediatamente post-ejercicio.

Tiempo Secuencial de Consumo de Carbohidratos luego del Ejercicio

El tiempo transcurrido entre la competición, o un esfuerzo de ejercicio prolongado, y el consumo de un suplemento de carbohidratos influirá críticamente en la tasa de resíntesis de glucógeno muscular (4). Cuando los suplementos con carbohidratos son provistos inmediatamente post-ejercicio, los mismos generalmente resultan en una tasa de resíntesis de glucógeno de entre 6 a 7 mmol/gr de peso húmedo/h. Esta tasa se mantiene por aproximadamente dos horas, y luego declina en aproximadamente un 50 % en las próximas dos horas, mientras los niveles de glucosa e insulina en sangre declinan a niveles post-ejercicio. Si la administración del suplemento se demora aproximadamente dos horas, la tasa de resíntesis de glucógeno durante las dos horas inmediatas al consumo, alcanza un rango de 3 a 4 mmol/gr de peso húmedo/h, o aproximadamente el 50 % de la velocidad alcanzada cuando el suplemento es provisto inmediatamente post-ejercicio. Esta tasa de resíntesis de glucógeno más baja ocurre a pesar de los incrementos normales en los niveles de glucosa e insulina en sangre. Parece ser que cuando el suplemento de carbohidratos se demora varias horas luego del ejercicio, el músculo se torna resistente a la insulina reduciendo la tasa de consumo de glucosa muscular y la resíntesis de glucógeno. Una vez desarrollado, este estado de resistencia a la insulina persiste por varias horas. La administración de un suplemento con carbohidratos inmediatamente después del ejercicio, por lo tanto, parece beneficiar al proceso de recuperación de glucógeno muscular, previniendo el desarrollo de resistencia del músculo a la insulina. Además, durante el tiempo entre el final del ejercicio y el consumo del suplemento de carbohidratos, hay muy poca resíntesis de glucógeno muscular (~ 1 a 2 mmol/gr de peso húmedo/h). Por lo tanto, el suministro de un suplemento de carbohidratos, inmediatamente después del ejercicio, tiene el beneficio adicional de comenzar con el proceso de recuperación de glucógeno muscular en forma inmediata.

El Efecto de Suplementos Múltiples y Diferentes Cantidades de Carbohidratos

El patrón de suplementación con carbohidratos, tanto como la cantidad de los mismos en cada suplemento, también es de importancia en la regulación de la resíntesis de glucógeno muscular. Cuando se provee un adecuado suplemento de carbohidratos, inmediatamente después del ejercicio, su efecto sobre la recuperación de glucógeno muscular eventualmente decaerá con el transcurso del tiempo, y lo propio ocurrirá con los niveles de glucosa e insulina en sangre. Sin embargo, Blom et al. (2) reportaron que mediante la administración de un suplemento de carbohidratos, inmediatamente después del ejercicio, y a intervalos de dos horas durante las siguientes cuatro horas, se logró mantener un nivel elevado de glucosa sanguínea y una rápida tasa de resíntesis de glucógeno muscular durante un período de recuperación de seis horas. Blom et al. (2) también hallaron que se debe consumir una cantidad crítica de carbohidratos si se quiere maximiazar la tasa de resíntesis de glucógeno muscular. Cuando se consumieron 0.7 o 1.4 gr de glucosa/kg de peso corporal de suplementos de carbohidratos a intervalos de dos horas, la tasa de acumulación de glucógeno no difirió entre los tratamientos, y promedió los 5.7 mmol/gr de peso húmedo/h. Sin embargo, cuando Blom et al. (2) suministraron 0.35 gr de glucosa/kg de peso corporal a intervalos de dos horas, la tasa de resíntesis de glucógeno muscular se redujo en 50 %.

Para evaluar mejor el nivel crítico de suplementación de carbohidratos requerido para la máxima resíntesis de glucógeno, evaluamos los efectos de suplementos con diferentes concentraciones de carbohidratos durante cuatro horas de recuperación post-ejercicio (Figura 1). Se encontró muy poca resíntesis de glucógeno muscular cuando el carbohidrato fue suspendido en los sujetos (~ 0.6 mmol/gr de peso húmedo/h). Sin embargo, con el incremento en la concentración de carbohidratos de los suplementos, la tasa de resíntesis de glucógeno muscular se incrementó exhibiendo un patrón curvilíneo y estabilizándose a una tasa de 5.5 mmol/gr de peso húmedo/h, en tanto la concentración de carbohidratos se aproximó a 1 a 1.5 gr/kg de peso corporal. Estos resultados implican que cuando se proveen suplementos de carbohidratos a intervalos de dos horas, en cantidades por debajo de 1 gr/kg de peso corporal, la tasa de resíntesis de glucógeno muscular será submáxima. La reducida tasa de resíntesis probablemente se deba a la incapacidad de un suplemento con pequeña cantidad de carbohidratos para incrementar y mantener los niveles de glucosa e insulina en sangre, adecuadamente, por un intervalo de dos horas, mientras que los suplementos con menores concentraciones, tomados más frecuentemente, parecen ser adecuados.

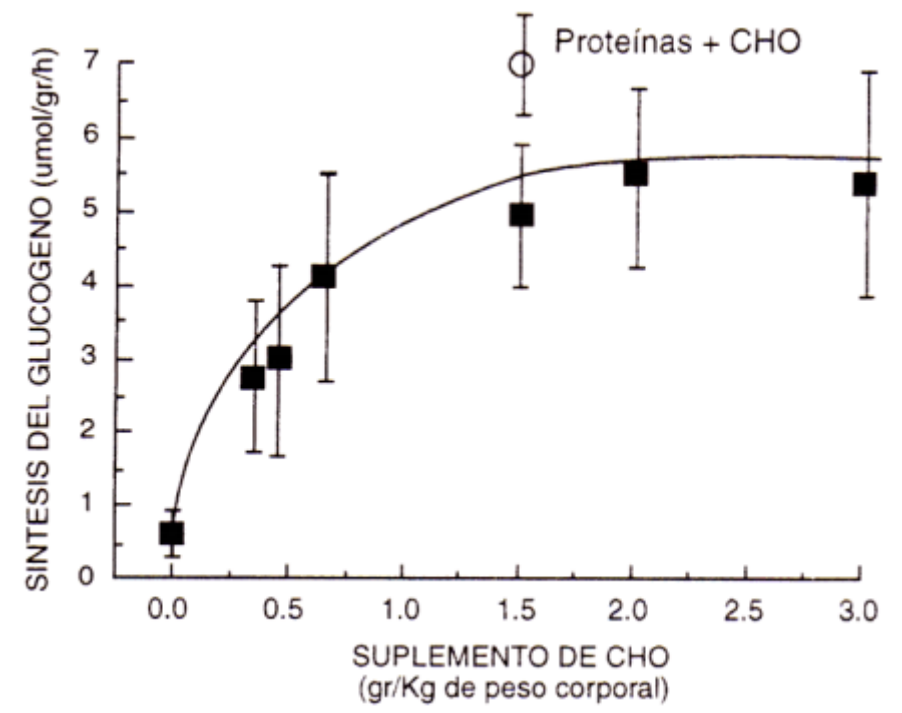

Figura 1. *Tasa de resíntesis de glucógeno muscular promedio durante un período de recuperación de ejercicio de cuatro horas, luego del consumo oral de diferentes concentraciones de carbohidratos (CHO) en un suplemento líquido (aproximadamente 21 % peso/vol). Los suplementos fueron provistos inmediatamente post-ejercicio, y dos horas después del mismo. Proteínas + CHO representa la tasa de resíntesis de glucógeno muscular promedio cuando ingirieron 1.5 gr/kg de peso corporal de CHO más 0.53 gr/kg de peso corporal de proteínas (leche y mezcla aislada de suero de proteínas, 7.6% peso/vol).*

La razón de tasas de resíntesis de glucógeno similares cuando los suplementos de carbohidratos exceden aproximadamente 1 gr/kg de peso corporal, no es totalmente clara. Estimaciones de las tasas de vaciamiento gástrico sugieren que el carbohidrato disponible en el músculo excedió por lejos la cantidad convertida a glucógeno. Por lo tanto, se podría hipotetizar que bajo condiciones de suplementación con una alta concentración de carbohidratos, el paso limitante de la tasa de resíntesis de glucógeno, puede ser tanto el transporte de glucosa como el procesamiento de esta a través de la vía de glucogenosíntesis. Para evaluar esta hipótesis, llevamos a cabo un estudio en el cual realizamos la infusión continua de 3 gr de glucosa/kg de peso corporal durante las primeras 3.75 horas de un período de recuperación de ejercicio de 4 hs, en sujetos depletados de glucógeno. La tasa de resíntesis de glucógeno muscular durante la infusión fue comparada con aquélla que ocurrió cuando se consumieron 1.5 g de glucosa/kg de peso corporal, inmediatamente y 2 hs. post-ejercicio (5). Durante la infusión, la glucosa sanguínea se incrementó a 10 mmol/L, en tanto el nivel de la misma solo alcanzó los 6 mmol/L cuando se consumió el suplemento de glucosa por vía oralmente. A pesar de esta gran diferencia en la concentración de glucosa sanguínea, las tasas de resíntesis de glucógeno muscular fueron virtualmente idénticas al final del período de recuperación. Estos resultados, por lo tanto, confirmaron nuestra hipótesis de que la resíntesis de glucógeno no está limitada por la disponibilidad de glucosa, cuando se consumen los carbohidratos adecuados. Sin embargo, se observó que los dos tratamientos no difirieron respecto de las respuestas de la insulina en sangre. La concentración de insulina en sangre desempeña un rol mayor en la determinación de la tasa de almacenamiento de glucógeno muscular. La insulina estimula tanto el transporte de glucosa muscular como la activación de la glucógeno sintetasa, la enzima limitante de la tasa de en la vía de glucogenosíntesis. Por lo tanto, consideramos el significado de incrementar la respuesta de la insulina al suplemento con carbohidratos, con el objeto de aumentar el consumo de glucosa muscular y su conversión a glucógeno.

Medios para Aumentar la Secreción de Insulina Durante la Resíntesis de Glucógeno

Ciertos aminoácidos son efectivos para provocar la secreción de insulina y se ha observado que incrementan sinérgicamente la respuesta de la insulina en sangre a la carga de carbohidratos cuando se administran en forma combinada. De los 20 aminoácidos normalmente encontrados en las proteínas, el más efectivo para provocar la liberación de insulina es la arginina. Se ha hallado evidencia de que cuando la arginina es infundida con carbohidratos, incrementa la respuesta de la insulina 5 veces en comparación a lo producido por los carbohidratos o la arginina, por si solos. Por esta razón, comparamos los efectos de la suplementación con un suplemento de carbohidratos con aquéllos provocados por un

suplemento a base de carbohidratos-arginina sobre la tasa de resíntesis de glucógeno muscular post-ejercicio (resultados no publicados). Los suplementos fueron suministrados inmediatamente, y a las 1, 2 y 3 horas post-ejercicio. Los suplementos consistieron en 1 gr de carbohidratos/kg de peso corporal, o 1 gr de carbohidratos más 0.08 gr de arginina/kg de peso corporal (mezcla al 23 % peso/vol). Durante el período de recuperación de cuatro horas el incremento en el glucógeno muscular fue de 24 mmol/gr peso húmedo, con el suplemento de carbohidratos, y de 36 mmol/gr peso húmedo con el suplemento a base de carbohidratos-arginina. No hubo diferencias en las respuestas de la glucosa o el lactato en sangre, entre ambos tratamientos. Tampoco hubo diferencias significativas entre los tratamientos respecto de la respuesta de la insulina. Por lo tanto, la mayor tasa de resíntesis de glucógeno durante el tratamiento de carbohidratos-arginina no debería atribuirse a un aumento de la respuesta de la insulina. Sin embargo, en el caso del agregado de arginina al suplemento de carbohidratos, se observó que la tasa de oxidación de carbohidratos se redujo durante la recuperación. La diferencia en la oxidación de carbohidratos entre los dos tratamientos, fue estimada en aproximadamente 10 mmol/gr peso húmedo. Esto sugiere que el incremento que la tasa de resíntesis de glucógeno, con la suplementación a a base de carbohidratos-arginina fue debido a un mayor porcentaje del consumo de glucosa muscular, el cual fue convertido a glucógeno como resultado de la supresión de la oxidación de carbohidratos.

Si bien el suplemento con carbohidratos-arginina pareció ser exitoso para provocar el incremento en la tasa de resíntesis de glucógeno muscular post-ejercicio, tuvo algunos efectos secundarios no deseados. Se observó que el suplemento tiene un gusto amargo y no muy sabroso. También causó borborismos suaves y diarreas en todos los sujetos. Esto ocurrió aproximadamente cinco horas después del ejercicio, y duró aproximadamente cinco horas, haciendo que el suplemento de carbohidratos-arginina se torne algo impráctico.

Aparte de los aminoácidos individuales, se encontró que las comidas y suplementos con proteínas también aumentan la respuesta de la insulina a la carga de carbohidratos. Spiller et al. (6) demostraron un incremento en la respuesta de la insulina en sangre, y una reducción en la respuesta de la glucosa en sangre al agregar de varias cantidades de proteínas (15.8, 25.1, 33.6 y 49.9 gr) a un suplemento de 58 gr de carbohidratos. Se halló que la respuesta de la insulina es directamente proporcional, y la de la glucosa inversamente proporcional, al contenido de proteínas en el suplemento de carbohidratos-proteínas. Por esta razón, investigamos los efectos de un suplemento de carbohidratos-proteínas sobre la resíntesis de glucógeno muscular post-ejercicio (7). Los suplementos evaluados consistieron en 112 gr de carbohidratos, o 112 gr de carbohidratos más 40.7 gr de proteínas (mezcla al 21 % peso/vol). Los suplementos fueron administrados inmediatamente post-ejercicio, y 2 hs post-ejercicio. Se encontró que la combinación de carbohidratos más proteínas produjo una respuesta sinérgica de la insulina. En conjunción con la mayor respuesta de la insulina, hubo una respuesta de la glucosa sanguínea significativamente más baja, y una tasa de acumulación de glucógeno 38 % más rápida, comparado con la suplementación con carbohidratos solos. Las tasas de resíntesis de glucógeno muscular promediaron los 7.1 (mmol/gr peso húmedo con el tratamiento de carbohidratos-proteínas, y 5.0 mmol/gr peso húmedo con el tratamiento de carbohidratos, durante un período de recuperación de 4 horas (Figura 1). También se evidenció que las tasas de oxidación de carbohidratos y las concentraciones de lactato en sangre fueron similares con ambos tratamientos. Estos resultados sugieren que el incremento de la tasa de resíntesis de glucógeno muscular, durante el tratamiento de carbohidratos-proteínas, fue el resultado de un aumento del *"clearance"* de glucosa por parte del músculo, debido al incremento de la respuesta de la insulina en sangre. Dado que el suplemento de carbohidratos-proteínas resultó tener buen sabor, y no hubo efectos secundarios no deseados, éste parecería ser un suplemento viable para la recuperación de glucógeno post-ejercicio.

Efecto de la Glucosa y Fructosa sobre la Resíntesis de Glucógeno

La glucosa y la fructosa son metabolizadas en forma diferente. Estas sustancias tienen diferentes tasas de vaciamiento gástrico, y son absorbidas en la sangre a diferentes tasas. Además, la respuesta de la insulina al suplemento con glucosa es generalmente mucho mayor que la observada ante la administración de un suplemento de fructosa. Blom et al. (2) observaron que la ingesta de glucosa y sucrosa fue el doble de efectiva que la de fructosa, para la restauración del glucógeno muscular. Los autores sugirieron que las diferencias entre la suplementación con glucosa y con fructosa fueron el resultado de la forma en que el cuerpo metabolizó estos azúcares. El metabolismo de la fructosa tiene lugar predominantemente en el hígado, mientras que la mayoría de la glucosa parece evitar el hígado, y ser absorbida u oxidada por el músculo. Se halló que cuando la fructosa es infundida produce una acumulación de glucógeno en el hígado, cuatro veces mayor que el de la glucosa. Por otro lado, se demostró que luego de la infusión de glucosa hubo una tasa de acumulación de glucógeno en el músculo esquelético, considerablemente más alta que luego de la infusión de fructosa.

Las tasas similares de acumulación de glucógeno con los suplementos de sucrosa y glucosa pueden no haber sido tenidas en cuenta por Blom et al. (2). La sucrosa contiene cantidades equimolares de glucosa y fructosa. Si la acumulación de glucógeno muscular fue principalmente dependiente de la parte "glucosa" del disacárido, uno podría esperar una tasa de restitución de glucosa más baja con la sucrosa, que con una cantidad similar de glucosa. Una explicación posible provista por Blom et al. (2) fue que la fructosa, en virtud de su rápido metabolismo en el hígado, comparada con el de la glucosa, inhibe el consumo de glucosa hepática post-ejercicio, liberándose por lo tanto, una gran proporción de glucosa absorbida,

la que queda disponible para la resíntesis de glucógeno muscular.

RECOMENDACIONES

En base a la información provista, hay diversas recomendaciones que pueden ser hechas para una rápida resíntesis de glucógeno muscular post-ejercicio.

- Debería consumirse un suplemento con carbohidratos, de aproximadamente 1 gr/kg de peso corporal, lo más pronto posible luego del ejercicio.
- La continuación con el suplemento, cada dos horas, mantendrá una rápida tasa de resíntesis por más de seis horas luego del ejercicio.
- Los suplementos deberían estar compuestos de glucosa o polímeros de glucosa. El agregado de algo de fructosa al suplemento puede ser benéfico, ya que promoverá una rápida resíntesis de glucógeno hepático.
- También se debería considerar que la adición de proteínas al suplemento de carbohidratos aumentará la respuesta de la insulina. Se ha hallado que la dosis efectiva es un cociente de 1 gr de proteína/2.5 gr de carbohidratos.

Los carbohidratos en forma sólida o líquida pueden ser consumidos inmediatamente después del ejercicio con resultados similares. Sin embargo, los suplementos líquidos son más recomendables, debido a que son fáciles de digerir y provocan una menor distención gástrica, y por lo tanto no tienden a afectar el normal apetito de las personas. Estos también proveen una fuente de fluidos para la rehidratación rápida.

REFERENCIAS

1. Bergstrom J, Hultman E (1967). Muscle glycogen synthesis after exercise: an enhancing factor localized to the muscle cells in man. *Nature 210: 309-310*
2. Blom PCS, Hostmark AT, Vaage O, Kardel KR, Maehlum S (1987). Effect of different post-exercise sugar diets on the rate of muscle glycogen synthesis. *Med Sci Sport Exerc 19:491-496*
3. Ivy JL (1991). Muscle glycogen synthesis before and after exercise. *Sports Med 11: 6-19*
4. Ivy JL, Katz AL, Cutler CL, Sherman WM, Coyle EF (1988). Muscle glycogen synthesis after exercise: effect on time of carbohydrate ingestión. *J Appl Physiol 64: 1480-1485*
5. Reed MJ, Brozinik JT, Lee MC, Ivy JL (1989). Muscle glycogen storage postexercise: effect of mode of carbohydrate administration. *J Appl Physiol 66: 720-726*
6. Spiller GA, Jensen CD, Pattison TS, Chuck CS, Whittam JH, Scala J (1987). Effect of protein dose on serum glucose and insulin response to sugar. *Am J Clin Nutr 46: 474-480*
7. Zawadzki KM, Yaspelkis BBIII, Ivy JL (1992). Carbohydrate- protein complex increases the rate of muscle glycogen storage after exercise. *J Appl Physiol 72: 1854-1859*

Cita Original

John L. Ivy. Resíntesis de Glucógeno Luego del Ejercicio: Efecto de la Ingesta de Carbohidratos. Resúmenes del IV Simposio Internacional de Actualización en Ciencias Aplicadas al Deporte Biosystem Servicio Educativo (Ed.), 169-172 (1998)