

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Un paso hacia la nutrición deportiva personalizada: la ingesta de carbohidratos durante el ejercicio

Asker Jeukendrup

© El autor, 2014. Este artículo se publica con acceso abierto en Springerlink.com

Resumen. En los últimos años, se han producido cambios significativos en la forma de entender la función de los carbohidratos durante el ejercicio de resistencia, lo que permite un asesoramiento más específico y personalizado respecto a la ingesta de carbohidratos durante el ejercicio. Las nuevas directrices que se proponen toman en consideración la duración (y la intensidad) del ejercicio; además, las recomendaciones sobre los hidratos de carbono no se limitan a la cantidad, sino que también ofrecen orientación acerca del tipo. Los estudios han demostrado que durante aproximadamente una hora de ejercicio, el enjuague bucal o el consumo de pequeñas cantidades de carbohidratos pueden ser beneficiosos para el rendimiento. Una sola fuente de hidratos de carbono se puede oxidar a un ritmo de hasta 60 g/h aproximadamente, y esto es lo que se recomienda para un ejercicio más prolongado (2-3 h). Para situaciones de alta resistencia, la recomendación asciende hasta los 90 g/h aproximadamente. Los carbohidratos que se consumen a ritmos de ingesta tan altos deben ser carbohidratos de transporte que permitan altas velocidades de oxidación e impidan la acumulación de hidratos de carbono en el intestino. La fuente del carbohidrato puede ser líquida, semisólida o sólida, y puede ser necesario ajustar a la baja las recomendaciones cuando la intensidad absoluta del ejercicio sea baja y, por tanto, las velocidades de oxidación también sean bajas. El asesoramiento acerca de la ingesta de hidratos de carbono no depende del peso corporal ni del grado de entrenamiento. Por consiguiente, aunque estas directrices son aplicables a la mayoría de los deportistas, dependen en gran medida del tipo y la duración de la actividad.

A. Jeukendrup
Instituto Gatorade de Ciencias del Deporte, Barrington,
Illinois, EE. UU.

A. Jeukendrup (✉)
Escuela de Ciencias del Deporte y el Ejercicio, Universidad
de Birmingham, Edgbaston B15 2TT, Reino Unido.
correo electrónico: a.e.jeukendrup@bham.ac.uk

Estas nuevas pautas pueden sustituir a las directrices genéricas actuales para el consumo de carbohidratos durante el ejercicio de resistencia.

1 Introducción

A comienzos del siglo XX, se descubrió que los hidratos de carbono eran un combustible importante para el ejercicio [1]. En 1939, se publicó un artículo que demostraba que la dieta podía influir en el consumo de carbohidratos durante el ejercicio, lo cual podía afectar a la tolerancia al ejercicio [2]. En la década de 1960, se concluyó que el glucógeno muscular desempeña una función significativa durante el ejercicio [3], mientras que en la década de 1980, aparecieron los primeros estudios que demostraban que la ingesta de hidratos de carbono durante el ejercicio mejora la capacidad deportiva [4, 5]. En los siguientes 20 años no se realizaron grandes avances, hasta 2004, el año que marcó el inicio de una era en la que se sucedieron enormes logros en relación con el consumo de carbohidratos durante el ejercicio.

Dado que estos avances y sus efectos sobre la nutrición deportiva se fueron publicando con el paso del tiempo, las recomendaciones para los deportistas también fueron evolucionando durante este periodo. En las pautas más recientes, se suele aceptar la importancia de la ingesta de carbohidratos para optimizar la resistencia, pero las sugerencias siguen sin ser muy específicas [6]. Los estudios habían demostrado que una cantidad relativamente baja de hidratos de carbono (20 g/h) eran suficientes para observar sus efectos beneficiosos para el rendimiento [7, 8]. A partir de un estudio realizado por Fielding y otros [7], se consideró que, como mínimo, eran necesarios 22 g de carbohidratos por hora para observar efectos favorables sobre el rendimiento. Los sujetos practicaron cuatro horas de ejercicio con un esprint final. Se percibieron mejoras en el rendimiento al tomar 22 g de hidratos de carbono cada hora. Sin embargo, no se observó ningún efecto al consumir la mitad de esa dosis (11 g/h). Según un estudio realizado por Maughan y otros [8], la ingesta de 16 g de glucosa por hora mejora la capacidad de resistencia un 14% en comparación con el agua (no se suministró ningún placebo en este estudio).

Al mismo tiempo, otros estudios apuntaban que la oxidación de carbohidratos exógenos nunca supera los 60 g/h [9], por lo que normalmente esta cifra se ha utilizado como límite máximo para la ingesta de hidratos de carbono durante el ejercicio. Las directrices más recientes publicadas por el Colegio Americano de Ciencias del Deporte (ACSM por sus siglas en inglés) recomiendan un consumo de carbohidratos de entre 30 y 60 g/h durante el ejercicio [6]. Se trata de una horquilla relativamente amplia, por lo que la ingesta dependerá del tipo de actividad, su duración o el nivel del deportista. A través de las pruebas aportadas por los estudios y los nuevos conocimientos adquiridos a lo largo de los últimos cinco o diez años, se puede ofrecer a los deportistas un asesoramiento más prescriptivo y preciso. En otros análisis recientes se han abordado de forma detallada las pruebas que sustentan todo esto y que exceden el ámbito de este artículo [10–15]. No obstante, el objetivo de este artículo es consolidar los diferentes datos que tenemos sobre los carbohidratos y traducir nuestros conocimientos actuales en directrices prácticas para deportistas que compiten en diferentes disciplinas.

2 Rendimiento e ingesta de carbohidratos durante el ejercicio

A pesar de que todavía no se entienden por completo los mecanismos exactos, desde hace tiempo se sabe que el consumo de carbohidratos durante el ejercicio puede aumentar y mejorar el rendimiento deportivo (se pueden consultar los artículos de Jeukendrup [12, 15]). En general, cuando el ejercicio dura más de dos horas, la ingesta de hidratos de carbono evita la hipoglucemia, mantiene altas tasas de oxidación de carbohidratos e incrementa la capacidad de resistencia en comparación con el consumo de un placebo. En un principio, se consideraba que el ejercicio debía durar al menos dos horas para que los carbohidratos surtieran algún efecto.

Sin embargo, más recientemente, se ha puesto de manifiesto que la ingesta de hidratos de carbono durante el ejercicio también puede mejorar el rendimiento cuando su duración es menor, pero su intensidad es superior (por ejemplo, en torno a una hora con una absorción de oxígeno del 75% como máximo; VO_{2max}). El mecanismo tras estas mejoras del rendimiento es totalmente diferente. De hecho, se demostró que al introducir glucosa en la circulación sistémica, esta glucosa se absorbía a velocidades elevadas, pero no se detectó ningún efecto sobre el rendimiento. [16]. Esto demuestra que una mayor disponibilidad de glucosa, como sustrato para el músculo que trabaja, no produce ningún efecto durante este tipo de actividad. No obstante, cabe señalar que cuando una persona se enjuagaba la boca con una solución de carbohidratos, se obtenían mejoras en el rendimiento [11] muy parecidas a las observadas con la ingesta de carbohidratos. Ahora existen numerosos estudios que, en definitiva, demuestran que este efecto es real. Esos estudios se han analizado en diversos artículos publicados recientemente [10–14]. Esto indicaría que los efectos beneficiosos del consumo de carbohidratos durante el ejercicio no se limitan a sus ventajas metabólicas convencionales, sino que también pueden contribuir a una

señal aferente más positiva, capaz de modificar la potencia motora [17]. Estos efectos son propios de los hidratos de carbono y no tienen relación con el sabor [18]. Se sabe que cuando se introducen alimentos o líquidos en la boca, las células receptoras del gusto reciben un estímulo y realizan el primer análisis del alimento potencialmente ingerible [19–21]. Las células receptoras del gusto se agrupan en conjuntos de entre 50 y 100 células en las papilas gustativas, que están repartidas por las distintas papilas de la lengua, el paladar blando y la epiglotis [22]. La actividad eléctrica iniciada por un sabor se transmite a las neuronas gustativas (nervios craneales VII, IX y X), que inervan las papilas gustativas [23, 24]. Esta información converge en el núcleo del tracto solitario de la médula, mientras que el núcleo ventromedial posterior del tálamo transmite a continuación esta información a la corteza gustativa primaria, ubicada en la insula anterior y el opérculo frontal, y a la corteza gustativa secundaria, situada en la corteza orbitofrontal [19]. Las cortezas primaria y orbitofrontal envían proyecciones a otras regiones del cerebro, como la corteza frontal dorsolateral, la corteza cingulada anterior y el estriado ventral, que, según se cree, son el enlace entre las vías gustativas y la respuesta correspondiente a nivel emocional, cognitivo y conductual [25, 26]. El hecho de que se haya indicado que los hidratos de carbono y los edulcorantes no nutritivos activan muchas de estas regiones cerebrales superiores [18, 27, 28] puede ofrecer una explicación mecanicista de los efectos positivos del enjuague bucal con carbohidratos sobre el rendimiento durante el ejercicio.

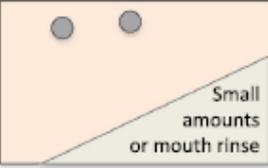
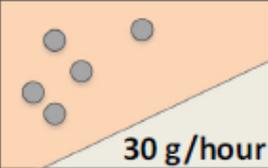
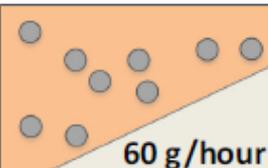
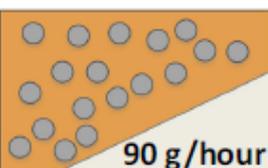
Sin embargo, aún no se han identificado los receptores de la cavidad oral que median estos efectos relacionados con el rendimiento, y las funciones exactas de las diferentes zonas del cerebro no se comprenden con claridad. Las células receptoras del gusto implicadas en realidad no detectan el sabor, sino los hidratos de carbono o la energía.

Es necesario continuar investigando para entender por completo cada una de las vías de transducción gustativa de los diversos tipos de carbohidrato y en qué se diferencian entre especies de mamíferos, especialmente en humanos. No obstante, se ha demostrado de forma convincente que los hidratos de carbono se detectan en la cavidad oral a través de receptores por identificar, lo que se puede vincular a las mejoras del rendimiento durante el ejercicio (se puede consultar el artículo de Jeukendrup y Chambers [11]). Las nuevas directrices que se sugieren en este artículo toman en consideración estas conclusiones (Fig. 1).

2.1 Consecuencias prácticas de los estudios de enjuague bucal

Estos resultados sugieren que no es necesario ingerir grandes cantidades de carbohidratos durante 30-60 minutos de ejercicio y que un enjuague bucal con carbohidratos puede ser suficiente para obtener una mejora del rendimiento (Fig. 1). En la mayoría de condiciones, los efectos del enjuague bucal sobre el rendimiento eran similares al consumo de una bebida de hidratos de carbono, por lo que no parece que la ingesta de la bebida suponga una desventaja, aunque en ocasiones los deportistas pueden sufrir malestar gastrointestinal al tomarla en mayores cantidades.

Fig. 1 Las nuevas directrices de consumo de carbohidratos. Las recomendaciones de consumo de hidratos de carbono durante el ejercicio dependen de su duración. En general, se aconseja incrementar la dosis de carbohidratos si la duración aumenta. El tipo de carbohidrato también puede variar, así como las recomendaciones de formación nutricional. Estas sugerencias son para atletas muy entrenados. Los deportistas menos entrenados pueden tener que ajustar estas cantidades a la baja.

Duración del ejercicio	Cantidad de carbohidratos necesarios	Tipo de carbohidrato recomendado	Recomendación adicional
30–75 minutes	 Small amounts or mouth rinse	Single or multiple transportable carbohydrates	Nutritional training recommended
1–2 hours	 30 g/hour	Single or multiple transportable carbohydrates	Nutritional training recommended
2–3 hours	 60 g/hour	Single or multiple transportable carbohydrates	Nutritional training highly recommended
> 2.5 hours	 90 g/hour	ONLY multiple transportable carbohydrates	Nutritional training essential

Cuando el ejercicio es más prolongado (dos horas o más), el carbohidrato se convierte en un combustible de gran importancia, esencial para evitar un descenso del rendimiento. Tal y como se ha explicado en los dos apartados anteriores, es posible que se requieran mayores cantidades de carbohidrato cuando el ejercicio dura más tiempo.

3 Ejercicio prolongado y carbohidratos de transporte múltiple

Se puede recurrir a la ingesta de distintos tipos de carbohidratos a diferentes ritmos durante el ejercicio [12], pero hasta la salida de una publicación fundamental en 2004 [29], se creía que los hidratos de carbono consumidos durante la actividad física solo se podían oxidar a una velocidad máxima de 1 g/min (60 g/h), independientemente del tipo de carbohidrato [9]. Esto se refleja en las directrices publicadas por el ACSM, que recomiendan que los deportistas tomen entre 30 y 60 g de hidratos de carbono durante el ejercicio de resistencia (más de una hora) [30] o 0,7 g/kg por hora [6].

Al parecer, la oxidación de los carbohidratos exógenos está limitada por la absorción intestinal de estos. Se cree que la glucosa emplea el transportador sodio dependiente (SGLT1) para la absorción, que se satura con una ingesta de carbohidratos de en torno a 60 g/h.

Cuando se consumía glucosa a este ritmo y al mismo tiempo que otro carbohidrato (fructosa) que utiliza un transportador diferente, las velocidades de oxidación superaban claramente la cantidad de 1 g/min (1,26 g/min) [29]. Tras este, se realizó una serie de estudios para tratar de descubrir la tasa máxima de oxidación de carbohidratos exógenos. En esos estudios, se modificaba el ritmo de ingesta, así como los tipos y combinaciones de carbohidratos consumidos. Todos los estudios confirmaron que el uso de varios carbohidratos tenía como resultado una mayor tasa de oxidación (hasta un 75% más) que los carbohidratos que emplean solo el SGLT1 (se pueden consultar los artículos de Jeukendrup [12, 15]). Esas altas tasas de oxidación no solo pueden alcanzarse con los hidratos de carbono ingeridos en una bebida, sino también en gel [31] o una barrita energética baja en grasa, proteína y fibra [32].

Se han publicado varios estudios que vinculan el aumento de las tasas de oxidación de carbohidratos de transporte múltiple con el retraso del cansancio y la mejora del rendimiento durante la actividad. En un estudio, los sujetos ingirieron 1,5 g/min de glucosa:fructosa o glucosa durante cinco horas de ejercicio de intensidad moderada, y se observó que las tasas de esfuerzo percibidas de los sujetos eran inferiores con la mezcla de glucosa y fructosa que solo con la glucosa.

Los ciclistas también conseguían mantener mejor el ritmo hacia el final de las cinco horas de pedaleo [33]. Rowlands y otros [34] confirmó estas conclusiones y registró una reducción del cansancio al consumir una mezcla de maltodextrina:fructosa (la maltodextrina es un polímero de glucosa poco dulce que se digiere muy rápido y, por tanto, se comporta exactamente igual que la glucosa). También se demostró que una bebida de glucosa:fructosa podía mejorar el rendimiento deportivo [35]. Varios ciclistas practicaron ejercicio durante dos horas en un cicloergómetro a 54 % VO_{2max} . En ese tiempo, ingirieron bien una bebida de carbohidratos, bien un placebo, y se les pidió que realizaran una prueba de contrarreloj de 60 min aproximadamente. Cuando los sujetos tomaban una bebida de glucosa (a 1,8 g/min), su potencia mejoraba un 9% (254 frente a 231 W). Sin embargo, cuando ingerían una bebida de glucosa:fructosa, se producía una mejora adicional de la potencia del 8% por encima de la obtenida con el consumo de glucosa (275 frente a 254 W). Este fue el primer estudio que mostró que las tasas de oxidación de carbohidratos exógenos pueden estar vinculadas al rendimiento; también fue el primero en demostrar una clara ventaja de la mezcla de glucosa:fructosa frente a la glucosa en términos de rendimiento [35]. Estas conclusiones se reprodujeron en Triplett y otros [36], quienes identificaron unas mejoras de rendimiento muy parecidas con la glucosa:fructosa frente a la glucosa sola.

Recientemente, Rowlands y otros [37] llevó la investigación un paso más allá, al estudiar a ciclistas entrenados en carreras en bicicleta de montaña (141 min de media) y ensayos de laboratorio (intervalos de alta intensidad de 94 minutos, seguidos de 10 esprints a máxima intensidad). Las soluciones de hidratos de carbono (maltodextrina:fructosa o glucosa:fructosa en índices de 2:1) se ingirieron a un ritmo medio de 1,2 g de carbohidratos/kg por hora (o 95 g/h). La solución de maltodextrina:fructosa redujo sustancialmente el tiempo de carrera en un 1,8% y los calambres abdominales en 8,1 puntos en una escala de 0 a 100. Tras tomar en consideración las molestias gastrointestinales, el efecto de la solución de maltodextrina:fructosa se redujo un 1,1% sobre el tiempo por vuelta, sugiriendo que las molestias gastrointestinales explicaban parte del efecto de la maltodextrina:fructosa sobre el rendimiento. En el laboratorio, la potencia media durante el sprint aumentó un 1,4% con la fructosa:maltodextrina.

En general, se han observado efectos beneficiosos en estudios de 2,5 h o más largos, y los efectos comienzan a ser visibles en la tercera hora de ejercicio [33]. Cuando la duración del ejercicio es menor, es posible que los carbohidratos de transporte múltiple no aporten las mismas ventajas a nivel de rendimiento [38], pero cabe destacar que los efectos son, como mínimo, parecidos a los de otras fuentes de hidratos de carbono.

4 El carbohidrato durante el ejercicio y el rendimiento: dosis-respuesta

Se han publicado muy pocos estudios bien controlados sobre la relación dosis-respuesta al ingerir carbohidratos durante el ejercicio y el rendimiento físico.

La mayor parte de los estudios más antiguos tienen graves problemas metodológicos que hacen que resulte complicado establecer una relación dosis-respuesta verdadera entre la cantidad de carbohidratos consumidos y el rendimiento. Hasta hace pocos años, la conclusión parecía ser que era necesaria una cantidad mínima de hidratos de carbono (probablemente *20 g/h, según un estudio), pero se suponía generalmente que no existía una relación dosis-respuesta [6].

Sin embargo, más recientemente han ido apareciendo pruebas de esa relación dosis-respuesta entre las tasas de ingesta de carbohidratos, las tasas de oxidación de carbohidratos exógenos y el rendimiento. En un estudio reciente realizado cuidadosamente, se midió el rendimiento en situaciones de resistencia y la selección de alimento durante un ejercicio prolongado en el que se ingería glucosa (15, 30 y 60 g/h) [39]. Doce personas montaron en bicicleta durante 2 h con un pico de absorción de oxígeno del 77% y, a continuación, realizaron una prueba de contrarreloj de 20 km. Los resultados apuntaron a la existencia de una relación entre la dosis de glucosa ingerida y las mejoras del rendimiento en ejercicios de resistencia. La oxidación de la glucosa exógena aumentó con la tasa de ingesta, y es posible que el incremento de la oxidación de carbohidratos exógenos esté directamente relacionado con el rendimiento deportivo o sea responsable de este.

Un estudio multicéntrico a gran escala realizado por Smith y otros [40] también investigó la relación entre la tasa de ingesta de carbohidratos y el rendimiento en pruebas de contrarreloj en bicicleta con el fin de identificar una franja de ingesta de carbohidratos que mejorase el rendimiento. En su estudio, en cuatro centros de estudio, 51 ciclistas y triatletas completaron cuatro sesiones de ejercicio consistentes en 2 h de bicicleta con carga constante a una intensidad entre moderada y alta. Se compararon 12 bebidas diferentes (compuestas por glucosa:fructosa, en una relación 2:1), proporcionando a los participantes 12 dosis de carbohidratos diferentes en una horquilla de 10-120 g de carbohidratos por hora durante el ejercicio de carga constante en bicicleta. Para ello se utilizaron carbohidratos de transporte múltiple (glucosa:fructosa). En las cuatro localizaciones, se suministró un mismo placebo, con edulcorantes, colorantes y saborizantes artificiales, que no contenía carbohidratos. El orden de consumo de las bebidas se asignó al azar en cada centro (tres en cada centro). Inmediatamente después del ejercicio con carga constante, los participantes completaron una prueba de contrarreloj de 20 km simulada por ordenador lo más rápido posible. La ingesta de carbohidratos aumentó significativamente el rendimiento en función de la dosis, y los autores concluyeron que la mayor mejora del rendimiento fue la observada con una tasa de ingesta de entre 60 y 80 g de carbohidratos por hora. Resulta interesante que estos resultados se correspondan con la ingesta de carbohidratos óptima propuesta por un metaanálisis realizado recientemente [41]. A partir de los estudios mencionados anteriormente, se pueden formular nuevas recomendaciones de ingesta de carbohidratos para ejercicios más prolongados, las cuales se detallan en la Fig. 1 y en el Apartado 5.

5 Recomendaciones de ingesta de carbohidratos durante diferentes ejercicios de resistencia

- Las recomendaciones de ingesta de hidratos de carbono durante el ejercicio (véase la Fig. 1) dependen de su duración e intensidad absoluta, así como del deporte y sus normas y reglamentos.
- Los deportistas que tienen un rendimiento inferior con intensidades absolutas inferiores tendrán unas tasas de oxidación de carbohidratos más bajas, por lo que las cantidades presentadas en la Fig.1 deberán ajustarse (a la baja) en consecuencia.
- La ingesta de carbohidratos recomendada se puede conseguir mediante el consumo de bebidas, geles o alimentos sólidos bajos en grasa, proteína y fibra (barritas), y su elección deberá basarse en las preferencias personales.
- Los deportistas pueden adoptar una estrategia combinada para cumplir sus objetivos de ingesta de carbohidratos.
- El consumo de hidratos de carbono debe equilibrarse con un plan de ingesta de líquido basado en las necesidades de líquido, y cabe destacar que se ha demostrado que los alimentos sólidos y las soluciones de carbohidratos muy concentradas reducen la absorción de líquidos.
- Es muy recomendable estudiar/practicar la estrategia de alimentación para la competición con el fin de reducir los riesgos de malestar gastrointestinal y aumentar la capacidad de absorción del intestino.

6 Grado de entrenamiento

Una pregunta que surge a menudo es si los resultados de esos estudios (realizados a menudo con personas entrenadas o muy entrenadas) se pueden trasladar a personas con un menor nivel de entrenamiento o a personas sin entrenamiento alguno. Existen algunos estudios que comparan un grupo de personas entrenadas con un grupo de personas no entrenadas. Por ejemplo, comparamos el uso del sustrato en hombres entrenados y no entrenados durante el ejercicio con ingesta de glucosa [42]. Todos los hombres practicaron ejercicio a un 60% de su VO_{2max} ; los hombres entrenados realizaron el ejercicio con una intensidad absoluta significativamente más alta. Consumieron la glucosa a intervalos regulares, con una ingesta media aproximada de 1,1 g/min. La oxidación total de los carbohidratos fue parecida en ambos grupos, pero la oxidación de la grasa y el consumo de energía fueron superior en el caso de los hombres entrenados. Cabe destacar que, aunque los hombres entrenados realizaron ejercicio a una potencia absoluta un 40% superior, la oxidación de la glucosa exógena no varió entre ambos grupos (0,95 g/min en el caso de los hombres entrenados y 0,96 g/min entre los hombres no entrenados) [42]. En un estudio de seguimiento, se observó a todos los sujetos, entrenados y no entrenados, practicando ejercicio a la misma intensidad, tanto relativa como absoluta [43]. De nuevo, no se detectó ninguna diferencia en la oxidación de carbohidratos exógenos entre personas entrenadas y no entrenadas, puesto que fue parecida en todas las pruebas.

Entre las personas entrenadas, que realizaron ejercicio a dos intensidades diferentes, tampoco se percibió ninguna diferencia en cuanto a oxidación de carbohidratos exógenos entre ambas intensidades [43].

No obstante, conviene señalar que las personas no entrenadas de ambos estudios [42, 43] tenían valores de VO_{2max} superiores a los de la población sedentaria, por lo que las directrices pueden extrapolarse a deportistas de diferentes niveles, pero no necesariamente a la población sedentaria. Sin embargo, según el estudio de van Loon y otros [43] en el que la intensidad absoluta del ejercicio no marcaba ninguna diferencia, es posible que exista un umbral por debajo del cual las tasas de oxidación exógena sean más bajas y todos los sujetos de esos estudios hayan realizado ejercicio siempre por encima de ese umbral de intensidad absoluto.

Tal vez no sea el grado de entrenamiento del deportista lo que importe, sino que sea la intensidad absoluta del ejercicio y las tasas absolutas de oxidación de los carbohidratos lo que determine las tasas de oxidación de carbohidratos exógenos. Resulta poco probable que un atleta que complete una maratón de cinco horas no necesite necesariamente una ingesta de 90 g de carbohidratos por hora, ya que esta cantidad se acercaría o podría incluso superar el uso total de carbohidratos a esa intensidad absoluta de ejercicio.

7 El efecto de la intensidad del ejercicio

Las necesidades de carbohidratos pueden ser diferentes con distintas intensidades de ejercicio. Cuando la intensidad del ejercicio es baja y las tasas de oxidación de los carbohidratos son bajas, las ingestas de carbohidratos recomendadas pueden tener que ajustarse a la baja. Sorprendentemente, existen pocos estudios en los que fundamentar recomendaciones firmes. Con un ejercicio de mayor intensidad, la masa muscular activa se vuelve cada vez más dependiente de los hidratos de carbono como fuente de energía. Tanto una mayor glucogenólisis muscular como una mayor oxidación de la glucosa plasmática contribuirán al aumento de las necesidades de energía [44]. Por consiguiente, resulta razonable contar con que la oxidación de carbohidratos exógenos incremente con el aumento de la intensidad del ejercicio. De hecho, uno de los primeros estudios, realizado por Pirnay y otros [45], concluyó que las tasas de oxidación de carbohidratos exógenos eran inferiores cuando las intensidades de ejercicio eran bajas en comparación con las intensidades moderadas, pero la oxidación de carbohidratos exógenos tendió a estabilizarse entre el 51% y 64% de la VO_{2max} . Entre el 60% y 75% de la VO_{2max} , no existía ninguna diferencia en cuanto a la oxidación de carbohidratos exógenos [45].

Por tanto, es posible que solo se observen tasas de oxidación de carbohidratos exógenos más bajas a intensidades de ejercicio muy bajas cuando la utilización del carbohidrato como fuente de energía es mínima. En esta situación, parte de los carbohidratos ingeridos pueden dedicarse a la eliminación de glucosa no oxidable (almacenamiento en el hígado o en los músculos), en vez de a la oxidación.

8 Efecto del peso corporal

Las directrices de ingesta de carbohidratos durante el ejercicio que se presentan en este artículo se expresan en gramos por hora de ejercicio y no ofrecen correcciones en función del peso corporal (PC). En la declaración de postura más reciente de la Asociación Americana de Dietética y el ACSM [6], las recomendaciones de ingesta de carbohidratos durante el ejercicio se expresa en gramos por kilogramo. La motivación para ello no está clara, ya que no parece existir ninguna correlación entre el PC y la oxidación de carbohidratos exógenos [12]. La razón de esta ausencia de correlación entre el PC y la oxidación de carbohidratos exógenos reside probablemente en el hecho de que el factor limitante es la absorción de carbohidratos, y esta depende en gran medida del PC. No obstante, es probable que la capacidad de absorción del intestino se vea modificada por el contenido de carbohidratos de la dieta, puesto que en estudios con animales, se ha demostrado que los transportadores intestinales se pueden regular al alza con una mayor ingesta de hidratos de carbono. Dado que el carbohidrato exógeno no depende del PC ni de la masa muscular, sino que depende de la absorción y, en cierto grado, de la intensidad absoluta del ejercicio (con intensidades absolutas muy bajas, las cantidades de carbohidratos bajas también pueden limitar la oxidación de carbohidratos exógenos), los consejos ofrecidos a los deportistas deberían expresarse en cantidades absolutas. Estos resultados demuestran claramente que no existe ninguna justificación para expresar las recomendaciones de carbohidratos para deportistas por kilogramo de PC (Apartado 5).

En resumen, existen diferencias individuales en la oxidación de carbohidratos exógenos, pero, por lo general, son pequeñas. Estas diferencias no guardan relación con el PC, sino que es más probable que estén vinculadas a la capacidad de absorción de carbohidratos, la cual, por su parte, podría estar relacionada con la dieta.

9 Educar el intestino

Dado que la absorción de carbohidratos limita la oxidación de carbohidratos exógenos, y esta oxidación parece estar relacionada con el rendimiento durante el ejercicio, una posible estrategia evidente sería aumentar la capacidad de absorción del intestino. Existen pruebas anecdóticas de deportistas que apuntan a que es posible educar el intestino y que las personas que consumen hidratos de carbono con regularidad o realizan una ingesta diaria de carbohidratos alta también pueden tener una mayor capacidad para absorberlos. De hecho, se pueden aumentar los transportadores de carbohidratos mediante la exposición de un animal a una dieta alta en hidratos de carbono [46]. Las pruebas con humanos hasta la fecha son limitadas. Un estudio reciente de Cox y otros [47] investigó si la modificación de la ingesta diaria de carbohidratos afecta a la oxidación de sustratos y, en especial, a la oxidación de carbohidratos exógenos. Se ha demostrado que las tasas de oxidación de carbohidratos exógenos eran superiores después de mantener una dieta alta en carbohidratos (6,5 g/kg PC/día; 1,5 g/kg PC suministrados principalmente como suplemento de carbohidratos durante el

entrenamiento) durante 28 días en comparación con una dieta de control (5 g/kg PC/día). Este estudio aportó pruebas de que el intestino es, en efecto, adaptable y que este hecho se puede utilizar como método práctico para aumentar la oxidación de carbohidratos exógenos. Hace poco, hemos sugerido que esto puede ser relevante para los atletas de resistencia y puede ser un requisito previo para que una persona rompa por primera vez la barrera de las dos horas de maratón [48]. Aunque es necesario investigar más, se recomienda practicar la estrategia de ingesta de carbohidratos durante el entrenamiento y dedicar al menos algo de tiempo a entrenar con una ingesta de carbohidratos relativamente alta.

10 Ingesta de carbohidratos en situaciones de la vida real

Existen relativamente pocos estudios que hayan investigado cuántos carbohidratos ingieren los deportistas durante las carreras y si cumplen o no las directrices recomendadas. En un estudio de Kimber y otros [49], la ingesta media de carbohidratos durante un triatlón con distancias Ironman fue de 1,0 g/kg PC/h en el caso de las triatletas femeninas y de 1,1 g/kg PC/h en el caso de los triatletas masculinos. Cumplieron estas dosis de carbohidratos al ingerir grandes cantidades de carbohidratos al practicar ciclismo (aproximadamente 1,5 g/kg PC7h). La mayor parte del consumo se produjo en el tramo en bicicleta, al multiplicar casi por tres la ingesta realizada durante el tramo de carrera a pie. En el caso de los atletas masculinos, la toma de carbohidratos tuvo una correlación positiva con el tiempo de finalización. Sin embargo, esta relación no se pudo confirmar en el caso de las mujeres. Un gran estudio de resistencia de Pfeiffer y otros [50] demostró una amplia variación en la ingesta de carbohidratos registrada por los atletas y entre disciplinas deportivas y dentro de cada una de ellas, produciéndose un consumo mayor en competiciones de ciclismo y triatlón e inferior en maratones. En ese estudio, también se concluyó que en las carreras Ironman, la ingesta de carbohidratos está relacionada con el tiempo de finalización, vinculando un mayor consumo de carbohidratos a un mejor rendimiento. Estas conclusiones parecen coincidir con los recientes estudios de dosis-respuesta de Smith y sus compañeros [39, 51].

11 Diferentes consejos para los distintos deportes de resistencia

Con el consumo de carbohidratos al practicar ciclismo, se ha demostrado en repetidas ocasiones que la descomposición del glucógeno muscular no se ve afectada. Al correr, sin embargo, existen indicios de que la descomposición de glucógeno muscular se reduce, especialmente en las fibras musculares de tipo I [52]. Por consiguiente, la ingesta de hidratos de carbono mejora el rendimiento al practicar ciclismo y al correr, aunque los mecanismos por los que se produce no sean necesariamente iguales. Esta cuestión se aborda con más detalle en el excelente artículo de Tsintzas y Williams [53]. La oxidación de carbohidratos exógenos parece similar en el ciclismo y al correr [54], lo que sugiere que los consejos para ciclistas y corredores no sean diferentes.

11.1 Deportes intermitentes y de habilidad

La gran mayoría de estudios se han realizado con atletas de resistencia practicando ejercicio de forma continua. La mayor parte de los deportes de equipo son de tipo intermitente, con ráfagas de ejercicios de muy alta intensidad seguidos por periodos de recuperación de intensidad relativamente baja. Asimismo, el rendimiento en estos deportes depende a menudo de otros factores más allá del mantenimiento de la velocidad o la potencia, y aspectos como la agilidad, la sincronía, las habilidades motoras, la toma de decisiones, los saltos y los sprints pueden desempeñar alguna función. No obstante, también se ha demostrado que la ingesta de carbohidratos durante el ejercicio refuerza la capacidad de resistencia en actividades intermitentes. Un gran número de estudios ha demostrado que el consumo de hidratos de carbono al correr de forma intermitente puede retrasar el cansancio y elevar el tempo hasta el agotamiento [55–59].

Los estudios han incorporado más recientemente la medición de habilidades en sus mediciones de rendimiento. Currell y otros [60] desarrolló un protocolo de simulación de 90 minutos de fútbol que incluía mediciones de habilidades, como agilidad, regates, tiros y remates de cabeza. Durante 90 minutos, los jugadores de fútbol practicaron ejercicio intermitente de una forma que imitaba sus patrones de movimiento durante un partido. A lo largo de los 90 minutos, se midió el rendimiento en las distintas habilidades a intervalos regulares. La agilidad, los regates y la precisión del tiro mejoraron con la ingesta de carbohidratos, sin embargo, el rendimiento al rematar de cabeza no se vio afectado. Otros estudios han identificado efectos similares [61]. Aunque normalmente algunas de las habilidades evaluadas en estos estudios mejoraban con el consumo de carbohidratos, se desconocen los mecanismos tras estas mejoras y no se han investigado en profundidad. Parece que la ingesta de hidratos de carbono durante la práctica de deportes de equipo u otros deportes con un componente de habilidad puede mejorar potencialmente la resistencia al cansancio y las habilidades propias de un deporte, sobre todo hacia el final del partido. En la práctica el reto suele ser encontrar maneras de consumir carbohidratos durante un partido sin infringir las reglas del deporte correspondiente.

12 Conclusión

En resumen, en los últimos años, se han producido cambios significativos en la forma de entender la función de los carbohidratos durante el ejercicio, lo que permite un asesoramiento más específico e individualizado respecto a la ingesta de carbohidratos durante el ejercicio. Las nuevas directrices que se proponen toman en consideración la duración (y la intensidad) del ejercicio; además, las recomendaciones sobre los hidratos de carbono no se limitan a la cantidad, sino que también ofrecen orientación acerca del tipo. Las recomendaciones que se presentan en este artículo se basan en su mayor parte de estudios con atletas entrenados o muy entrenados. Los deportistas que tienen un rendimiento inferior con intensidades absolutas inferiores tendrán unas tasas de oxidación de carbohidratos más bajas,

Springer

por lo que las cantidades que aquí se presentan deberán ajustarse (a la baja) en consecuencia. La ingesta de carbohidratos recomendada se puede conseguir mediante el consumo de bebidas, geles o alimentos sólidos bajos en grasa, proteína y fibra (barritas), y su elección vendrá determinada por las preferencias personales. Los deportistas pueden adoptar una estrategia combinada para cumplir sus objetivos de ingesta de carbohidratos. Sin embargo, el consumo de hidratos de carbono debe equilibrarse con un plan de ingesta de líquido, y cabe destacar que se ha demostrado que los alimentos sólidos y las soluciones de carbohidratos muy concentradas reducen la absorción de líquidos. Aunque la ralentización del vaciado gástrico y la absorción se pueden evitar en parte gracias a los carbohidratos de transporte múltiple, se trata de una cuestión que los deportistas deben tener en cuenta al desarrollar su estrategia de nutrición. A pesar de que es necesario continuar investigando, es muy recomendable que los atletas prueben la estrategia de alimentación en entrenamientos con el fin de reducir los riesgos de malestar gastrointestinal y aumentar la capacidad de absorción del intestino.

Por último, cabe destacar que la mayor parte de los estudios se basan en conclusiones alcanzadas con corredores y ciclistas, por lo que es necesario trabajar más para establecer los mecanismos subyacentes y los efectos de la ingesta de carbohidratos sobre los componentes de habilidad de los deportes intermitentes de equipo. Las recomendaciones se han resumido en la Fig. 1 y en el Apartado 5.

Agradecimientos. Este artículo se ha publicado en un suplemento respaldado por el Instituto Gatorade de Ciencias del Deporte. El suplemento ha sido elaborado por el editor invitado Lawrence L. Spriet, que asistió a una reunión del panel de expertos del Instituto Gatorade de Ciencias del Deporte (GSSI, por sus siglas en inglés) en abril de 2012 y percibió honorarios del GSSI, una división de PepsiCo, Inc. por su participación en la reunión y la redacción de su manuscrito. L.L.S. no ha recibido honorario alguno por la edición del suplemento en calidad de editor invitado. L.L.S. ha seleccionado a los revisores de la revisión por pares para cada artículo y ha gestionado el proceso. Asker Jeukendrup es empleado del Instituto Gatorade de Ciencias del Deporte, una división de PepsiCo, Inc. Las opiniones expresadas en este manuscrito pertenecen al autor y no reflejan necesariamente la postura o la política de PepsiCo, Inc.

Acceso abierto Este artículo se distribuye conforme a los términos y condiciones de la Licencia de Atribución Creative Commons que permite cualquier uso, distribución y reproducción del presente en cualquier soporte, siempre que se cite a los autores originales y la fuente.

Referencias

1. Krogh A, Lindhard J. The relative value of fat and carbohydrate as sources of muscular energy. *Biochem J.* 1920;14:290–363.
2. Christensen EH, Hansen O. Arbeitsfähigkeit und Ernährung. *Scand Arch Physiol.* 1939;81:160–71.
3. Bergstrom J, Hultman E. Muscle glycogen synthesis after exercise: an enhancing factor localized in muscle cells in man. *Nature.* 1966;210:309–10.
4. Coyle EF, Hagberg JM, Hurley BF, et al. Carbohydrate feeding during prolonged strenuous exercise. *J Appl Physiol.* 1983;55: 230–5.

5. Coggan AR, Coyle EF. Reversal of fatigue during prolonged exercise by carbohydrate infusion or ingestion. *J Appl Physiol.* 1987;63:2388–95.
6. Rodriguez NR, Di Marco NM, Langley S, American College of Sports Medicine position stand. Nutrition and athletic performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41:709–31.
7. Fielding RA, Costill DL, Fink WJ, et al. Effect of carbohydrate feeding frequencies and dosage on muscle glycogen use during exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 1985;17:472–6.
8. Maughan RJ, Bethell LR, Leiper JB. Effects of ingested fluids on exercise capacity and on cardiovascular and metabolic responses to prolonged exercise in man. *Exp Physiol.* 1996;81:847–59.
9. Jeukendrup AE, Jentjens R. Oxidation of carbohydrate feedings during prolonged exercise: current thoughts, guidelines and directions for future research. *Sports Med.* 2000;29:407–24.
10. Jeukendrup AE. Carbohydrate intake during exercise and performance. *Nutrition.* 2004;20:669–77.
11. Jeukendrup AE, Chambers ES. Oral carbohydrate sensing and exercise performance. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care.* 2010; 13:447–51.
12. Jeukendrup AE. Carbohydrate and exercise performance: the role of multiple transportable carbohydrates. *Curr Opin Clin Nutr Metab Care.* 2010;13:452–7.
13. Jeukendrup AE, McLaughlin J. Carbohydrate ingestion during exercise: effects on performance, training adaptations and trainability of the gut. *Nestle Nutr Inst Workshop Ser.* 2011;69:1–12 (discussion 13–7).
14. Jeukendrup AE. Nutrition for endurance sports: marathon, triathlon, and road cycling. *J Sports Sci.* 2011;29(Suppl. 1):S91–9.
15. Jeukendrup A. Carbohydrate feeding during exercise. *Eur J Sport Sci.* 2008;8:77–86.
16. Carter JM, Jeukendrup AE, Mann CH, Jones DA. The effect of glucose infusion on glucose kinetics during a 1-h time trial. *Med Sci Sports Exerc.* 2004;36:1543–50.
17. Gant N, Stinear CM, Byblow WD. Carbohydrate in the mouth immediately facilitates motor output. *Brain Res.* 2010;1350:151–8.
18. Chambers ES, Bridge MW, Jones DA. Carbohydrate sensing in the human mouth: effects on exercise performance and brain activity. *J Physiol.* 2009;587:1779–94.
19. Small DM, Bender G, Veldhuizen MG, et al. The role of the human orbitofrontal cortex in taste and flavor processing. *Ann NY Acad Sci.* 2007;1121:136–51.
20. Bender G, Veldhuizen MG, Meltzer JA, et al. Neural correlates of evaluative compared with passive tasting. *Eur J Neurosci.* 2009;30:327–38.
21. Chandrashekar J, Hoon MA, Ryba NJP, et al. The receptors and cells for mammalian taste. *Nature.* 2006;444:288–94.
22. Scott TR, Plata-Salaman CR. Taste in the monkey cortex. *Physiol Behav.* 1999;67:489–511.
23. Simon SA, de Araujo IE, Gutierrez R, et al. The neural mechanisms of gustation: a distributed processing code. *Nat Rev Neurosci.* 2006;7:890–901.
24. Stapleton JR, Lavine ML, Wolpert RL, et al. Rapid taste responses in the gustatory cortex during licking. *J Neurosci.* 2006;26:4126–38.
25. Kringelbach ML. Food for thought: hedonic experience beyond homeostasis in the human brain. *Neuroscience.* 2004;126:807–19.
26. Rolls ET. Sensory processing in the brain related to the control of food intake. *Proc Nutr Soc.* 2007;66:96–112.
27. Frank GK, Oberndorfer TA, Simmons AN, et al. Sucrose activates human taste pathways differently from artificial sweetener. *Neuroimage.* 2008;39:1559–69.
28. Haase L, Cerf-Ducastel B, Murphy C. Cortical activation in response to pure taste stimuli during the physiological states of hunger and satiety. *Neuroimage.* 2009;44:1008–21.
29. Jentjens RL, Moseley L, Waring RH, et al. Oxidation of combined ingestion of glucose and fructose during exercise. *J Appl Physiol.* 2004;96:1277–84.
30. Sawka MN, Burke LM, Eichner ER, American College of Sports Medicine position stand, et al. Exercise and fluid replacement. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39:377–90.
31. Pfeiffer B, Stellingwerff T, Zaltas E, et al. CHO oxidation from a CHO gel compared with a drink during exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;42:2038–45.
32. Pfeiffer B, Stellingwerff T, Zaltas E, et al. Oxidation of solid versus liquid CHO sources during exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;42:2030–7.
33. Jeukendrup AE, Moseley L, Mainwaring GI, et al. Exogenous carbohydrate oxidation during ultraendurance exercise. *J Appl Physiol.* 2006;100:1134–41.
34. Rowlands DS, Thorburn MS, Thorp RM, et al. Effect of graded fructose coingestion with maltodextrin on exogenous 14C-fructose and 13C-glucose oxidation efficiency and high-intensity cycling performance. *J Appl Physiol.* 2008;104:1709–19.
35. Currell K, Jeukendrup AE. Superior endurance performance with ingestion of multiple transportable carbohydrates. *Med Sci Sports Exerc.* 2008;40:275–81.
36. Triplett D, Doyle JA, Rupp JC, et al. An isocaloric glucosefructose beverage's effect on simulated 100-km cycling performance compared with a glucose-only beverage. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2010;20:122–31.
37. Rowlands DS, Swift M, Ros M, et al. Composite versus single transportable carbohydrate solution enhances race and laboratory cycling performance. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2012;37:425–36.
38. Hulston CJ, Wallis GA, Jeukendrup AE. Exogenous CHO oxidation with glucose plus fructose intake during exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2009;41:357–63.
39. Smith JW, Zachwieja JJ, Peronnet F, et al. Fuel selection and cycling endurance performance with ingestion of [¹³C]glucose: evidence for a carbohydrate dose response. *J Appl Physiol.* 2010;108:1520–9.
40. Smith JW, Zachwieja JJ, Horswill CA, et al. Evidence of a carbohydrate dose and prolonged exercise performance relationship. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;42:84.
41. Vandenberghe TJ, Hopkins WG. Monitoring acute effects on athletic performance with mixed linear modeling. *Med Sci Sports Exerc.* 2010;42:1339–44.
42. Jeukendrup AE, Mensink M, Saris WH, et al. Exogenous glucose oxidation during exercise in endurance-trained and untrained subjects. *J Appl Physiol.* 1997;82:835–40.
43. van Loon LJ, Jeukendrup AE, Saris WH, et al. Effect of training status on fuel selection during submaximal exercise with glucose ingestion. *J Appl Physiol.* 1999;87:1413–20.
44. van Loon LJ, Greenhaff PL, Constantin-Teodosiu D, et al. The effects of increasing exercise intensity on muscle fuel utilisation in humans. *J Physiol.* 2001;536:295–304.
45. Pirnay F, Crielaard JM, Pallikarakis N, et al. Fate of exogenous glucose during exercise of different intensities in humans. *J Appl Physiol.* 1982;53:1620–4.
46. Ferraris RP. Dietary and developmental regulation of intestinal sugar transport. *Biochem J.* 2001;360:265–76.
47. Cox GR, Clark SA, Cox AJ, et al. Daily training with high carbohydrate availability increases exogenous carbohydrate oxidation during endurance cycling. *J Appl Physiol.* 2010;109:126–34.
48. Stellingwerff T, Jeukendrup AE. Authors reply to viewpoint by Joyner et al. entitled “The two-hour marathon: who and when?”. *J Appl Physiol.* 2011;110:278–93.
49. Kimber NE, Ross JJ, Mason SL, et al. Energy balance during an ironman triathlon in male and female triathletes. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2002;12:47–62.
50. Pfeiffer B, Stellingwerff T, Hodgson AB, et al. Nutritional intake and gastrointestinal problems during competitive endurance events. *Med Sci Sports Exerc.* 2012;44:344–51.

51. Smith JW, Pascoe DD, Passe DH, et al. Curvilinear dose-response relationship of carbohydrate (0–120 g/h) and performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2013;45:336–41.
52. Tsintzas OK, Williams C, Boobis L, et al. Carbohydrate ingestion and glycogen utilisation in different muscle fibre types in man. *J Physiol.* 1995;489:243–50.
53. Tsintzas K, Williams C. Human muscle glycogen metabolism during exercise: effect of carbohydrate supplementation. *Sports Med.* 1998;25:7–23.
54. Pfeiffer B, Stellingwerff T, Zaltas E, et al. Carbohydrate oxidation from a drink during running compared with cycling exercise. *Med Sci Sports Exerc.* 2011;43:327–34.
55. Nicholas CW, Williams C, Lakomy HK, et al. Influence of ingesting a carbohydrate-electrolyte solution on endurance capacity during intermittent, high-intensity shuttle running. *J Sports Sci.* 1995;13:283–90.
56. Nicholas CW, Nuttall FE, Williams C. The Loughborough Intermittent Shuttle Test: a field test that simulates the activity pattern of soccer. *J Sports Sci.* 2000;18:97–104.
57. Foskett A, Williams C, Boobis L, et al. Carbohydrate availability and muscle energy metabolism during intermittent running. *Med Sci Sports Exerc.* 2008;40:96–103.
58. Davison GW, McClean C, Brown J, et al. The effects of ingesting a carbohydrate-electrolyte beverage 15 minutes prior to high-intensity exercise performance. *Res Sports Med.* 2008;16:155–66.
59. Patterson SD, Gray SC. Carbohydrate-gel supplementation and endurance performance during intermittent high-intensity shuttle running. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2007;17:445–55.
60. Currell K, Conway S, Jeukendrup AE. Carbohydrate ingestion improves performance of a new reliable test of soccer performance. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 2009;19:34–46.
61. Ali A, Williams C, Nicholas CW, et al. The influence of carbohydrate-electrolyte ingestion on soccer skill performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2007;39:1969–76.