



CONSIDERAÇÕES SOBRE HIDRATAÇÃO E NUTRIÇÃO NA PRÁTICA DE CICLISMO DE ENDURANCE NO CALOR

[Publicado: Abril de 2025/ Autores: James R. Merritt, MA, Michal Ozga, MS, and J. Matthew Hinkley, PhD/ Tópicos: Saúde do Atleta, Hidratação e Termorregulação, Esporte Específico, Nutrição Esportiva, Treino e Performance]

James R. Merritt, MA | Michal Ozga, MS | J. Matthew Hinkley, PhD
Instituto Gatorade de Ciências Esportivas, Valhalla, NY, Estados Unidos

PONTOS-CHAVE:

- O ciclismo de estrada é considerado uma das competições mais exigentes metabolicamente nos esportes de endurance, com gastos diários de energia 4 a 5 vezes maiores que as taxas basais do metabolismo.
- A combinação da hipoidratação e do estresse térmico observada durante uma atividade de ciclismo de longa duração em condições ambientais quentes pode levar à debilitação da função cardiovascular e da performance em exercícios com intensidades mais altas.
- Tanto o estado de hidratação quanto a reposição de energia podem impactar a performance do exercício de endurance ao se exercitar no calor.
- A exposição ao calor pode exacerbar ainda mais uma maior dependência de carboidratos como fonte de energia durante o exercício, levando a uma redução dos níveis de glicogênio muscular e uma maior prevalência da fadiga.
- A aclimação ao calor e o treinamento intestinal adequados podem servir como meio prático para manter o balanço hídrico, preservando o volume do plasma e protegendo a função cardiovascular na prática de atividade física em condições ambientais quentes.

INTRODUÇÃO

Corridas de ciclismo podem durar de minutos (por exemplo, testes de tempo) a diversas horas, ocasiões em que os ciclistas podem enfrentar uma combinação de longos períodos de exercício, sessões razoavelmente intensas (como, por exemplo, no pelotão), além de condições montanhosas englobando alta potência gerada e sprints que combinam altas velocidade e potência. O ciclismo de estrada é considerado uma das competições que apresenta as maiores demandas metabólicas nos esportes de endurance, com gastos diários de energia 4 a 5 vezes maiores que as taxas basais do metabolismo, totalizando 6.000 a 8.500 calorias gastas durante uma determinada etapa da competição (Areta et al., 2024; Barranco-Gil et al., 2024; Van Hooren et al., 2023). A demanda energética aumenta a produção metabólica de calor pela musculatura contrátil, colocando pressão adicional no sistema termorregulatório para manter a temperatura corporal central. A transpiração é o principal mecanismo para reduzir a temperatura central, com taxas de sudorese médias durante o ciclismo de estrada variando entre 0,5 e 2,0 L/h (Jay et al., 2024). Sem a ingestão adequada de líquidos, em conjunto com a longa duração das corridas, maiores taxas de sudorese podem impactar severamente o balanço hídrico, com estudos demonstrando que os ciclistas podem perder mais que 2% de massa corporal (MC) (Armstrong et al., 2015; Sharwood et al., 2004), o que mostrou-se reduzir a performance em exercícios de endurance (Cheuvront et al., 2003). Em conjunto com a carga das corridas que englobam etapas de vários dias cobrindo centenas de milhas, os ciclistas também precisam lutar com as condições

ambientais implacáveis. Durante a primeira etapa do Tour de France 2024, o indicador de calor atingiu 40°C [104°F]. Isso foi após o Tour 2023, no qual as temperaturas ambientais excederam 30°C (86°F) em 5 das 21 etapas da competição. Somado à temperatura ambiental, o calor radiante refletido pode impactar os corredores também, com a etapa mais quente no Tour de France 2023 apresentando temperaturas da superfície da estrada de até 60°C [140°F]. Como as corridas normalmente começam no início da tarde, os corredores competem regularmente durante as horas mais quentes do dia. Com diferentes estágios da corrida acontecendo sob estressores ambientais extremos, é imperativo entender as alterações fisiológicas que ocorrem durante o exercício de ciclismo realizado no calor para auxiliar no desenvolvimento de estratégias adequadas de hidratação e ingestão de energia para otimizar a performance. O objetivo desse artigo do Sports Science Exchange (SSE) é fornecer uma visão geral das cargas fisiológicas durante o exercício de ciclismo no calor, com foco principal no impacto do balanço hídrico e do metabolismo na performance sob essas condições. O artigo fornece recomendações de hidratação e nutricionais para exercícios de ciclismo em condições ambientais quentes, assim como identifica futuras considerações para atletas e treinadores visando otimizar a performance no ciclismo sob estresse térmico ambiental extremo. Ele também vai discutir brevemente como as estratégias de mitigação do calor (como, aclimação ao calor) e o treinamento intestinal promovem alterações positivas no balanço hídrico e no metabolismo.

DEMANDAS FISIOLÓGICAS

Balanço Hídrico

É geralmente reconhecido que a perda de 2% ou mais da MC leva a reduções significativas na capacidade de exercício e na performance de endurance [Cheuvront & Kenefick, 2014]. Foram descritas inúmeras alterações fisiológicas devido à hipoidratação [por exemplo, maior déficit de líquido corporal que a flutuação diária normal] durante o exercício, incluindo a redução do volume de plasma circulante [Sawka et al., 2015], volume sistólico [VS] e débito cardíaco [DC] [Montain & Coyle, 1992], e o aumento na temperatura corporal [Sawka et al., 1985], na utilização de glicogênio muscular [Logan-Sprenger et al., 2012] e na percepção de esforço [Funnell et al., 2019]. Quando somada ao estresse térmico, a pressão fisiológica no corpo é exacerbada, devido à maior competição entre os sistemas circulatórios central e periférico por um volume sanguíneo reduzido [Kenefick et al., 2010], inibindo a habilidade do corpo humano em manter a função cardiovascular adequada durante o exercício prolongado. A interação entre a hipoidratação induzida pelo exercício e o estresse térmico durante a prática de ciclismo foi caracterizada por um aumento na resistência periférica total [RPT] e reduções no DC, na pressão arterial média e no VS [González-Alonso et al., 1997; Montain & Coyle, 1992], particularmente em intensidades maiores que 60% da capacidade aeróbica máxima [V02max]. Mostrou-se que a RPT [resistência no sistema circulatório utilizada para mediar o fluxo sanguíneo] foi 10 a 17% maior em ciclistas do sexo masculino experientes em endurance, após 2 horas de ciclismo contínuo com intensidade moderada [62–71% da V02max] em condições ambientais quentes [35°C, 95°F] quando em déficit de aproximadamente 4,4 – 4,9% da MC, em comparação com a euidratação (< ±2% de alteração no líquido corporal total) [González-Alonso et al., 1997]. Sob condições semelhantes, Montain & Coyle [1992] relataram uma correlação linear mais forte entre o grau de hipoidratação e o declínio no VS observado ($r = 0,99$) após 2 horas de ciclismo contínuo de intensidade moderada [62–67% da V02max]. González-Alonso et al. [1997] demonstraram que a hipertermia induzida pelo exercício [temperatura corporal > 40°C, 104°F] e hipoidratação reduziram de maneira separada o VS em 7–8% [11 ml/batida], mas aumentaram a frequência cardíaca de maneira apropriada para prevenir uma redução significativa no DC. Contudo, quando a hipertermia e a hipoidratação induzidas pelo exercício foram sobrepostas, a redução observada no VS foi significativamente maior [26 ml/batida] e o DC não foi preservado [–2,8 L/min] [González-Alonso et al., 1997]. Watanabe et al. [2020] observaram reduções semelhantes no VS [27 ml/batida] e no DC [2,1 L/min] tanto em ciclistas do sexo masculino quanto feminino após 2 horas de ciclismo contínuo com intensidade moderada [50–55% da máxima potência gerada] pedalando em condições ambientais quentes [35°C, 95°F; 50% de umidade relativa [UR]], e concluíram que os declínios observados no VS e no DC podem ter sido provenientes das limitações no retorno

venoso e no enchimento do ventrículo esquerdo devido à redução do líquido corporal total. Sob condições normais, um aumento na RPT poderia ser utilizado como uma contramedida para moderar a pressão sanguínea e a entrega de oxigênio, devido às alterações agudas no volume do plasma. Contudo, a redução significativa [~5%] na média da pressão arterial [por exemplo, o produto do DC e da RPT] observada por Gonzalez-Alonso et al. [1995, 1997] sugeriu que a hipoidratação induzida pelo exercício pode limitar a habilidade do corpo em manter a função cardiovascular, prejudicando a capacidade de exercício.

Evidências sugerem que alterações fisiológicas provenientes de 2% de perda de MC ou mais possam prejudicar a performance no ciclismo em temperaturas mais quentes, sendo relatadas reduções para a potência gerada, velocidade [Adams et al., 2018, 2019] e conclusões de testes de tempo [TT] [Funnell et al., 2019]. Por exemplo, Adams et al. [2018] relataram menores potência gerada e velocidade de ciclismo durante um TT de 5 km após 2 horas de ciclismo contínuo com intensidade moderada [55% da V02max] em um ambiente quente e seco [35°C, 95°F; 30% de UR] quando indivíduos do sexo masculino estiveram em um déficit de MC de aproximadamente 2%, comparado com indivíduos euidratados. Sob condições semelhantes, reduções comparáveis na performance de ciclismo foram relatadas em indivíduos do sexo masculino completando um TT 15 minutos mais lento [2–18%] após cerca de 3% de perda de MC, em comparação com indivíduos euidratados, após 2 horas de ciclismo contínuo em 50% do pico da potência gerada [Funnell et al., 2019]. Em conjunto, esses resultados respaldam o entendimento de que a combinação observada da hipoidratação e do estresse térmico durante a prática de ciclismo por longos períodos em condições ambientais quentes pode levar a reduções na performance em exercícios com intensidades mais altas. Além das alterações fisiológicas devido à hipoidratação, reduções adicionais na performance na prática de ciclismo por longos períodos no calor podem ocorrer por meio de alterações no sistema nervoso simpático e na seleção das fontes de energia.

Alterações Metabólicas

Ciclistas dependem extremamente do metabolismo oxidativo, com energia proveniente de fontes de carboidrato intramusculares, fontes não-musculares [do sangue, fígado, adipose] e fontes de gordura [Hargreaves & Spriet, 2020]. Os principais determinantes da utilização de substrato incluem a intensidade e a duração do exercício [Hargreaves & Spriet, 2020; Romijn et al., 1993]. No nível mais alto da competição, os atletas competem normalmente em intensidades mais altas de exercício [80–100% da V02max] mesmo durante eventos de longa duração, como o ciclismo de endurance [Hargreaves & Spriet, 2020; Hawley & Leckey, 2015; O'Brien et al., 1993].

Como o rendimento energético é mais eficiente em comparação com a utilização de gorduras, conta-se fortemente com a oxidação de carboidratos durante as competições, com maior utilização de carboidratos provenientes do estoque de glicogênio muscular [Romijn et al., 1993]. Contudo, os estoques de glicogênio muscular são finitos [aproximadamente 1.000–3.000 kcal], e a redução nos níveis de glicogênio muscular leva a uma maior prevalência de fadiga e redução da performance [Hargreaves & Spriet, 2020]. A exposição ao calor pode exacerbar ainda mais a maior dependência de carboidratos como fonte de energia durante o exercício. Estudos anteriores indicaram uma maior relação da troca respiratória em atletas experientes em endurance durante exercícios de ciclismo em condições ambientais quentes [40°C, 104°F], em comparação a condições mais frescas [20°C, 68°F] [Febbraio et al., 1994a, b; Hargreaves et al., 1996], sugerindo uma maior dependência do uso de carboidratos. Essa maior dependência da utilização de carboidratos durante exercícios de ciclismo no calor pode ter origem das diferenças na intensidade do exercício, condições ambientais [como, temperatura, UR, calor radiante, velocidade do vento] e das alterações na temperatura corporal central e temperatura muscular. Especificamente, Maund et al. [2020] relataram que, no estresse térmico moderado [34–35°C, 93–95°F], aumentos na oxidação de carboidratos foram apenas evidentes em intensidades mais altas de exercício [~81% da $\dot{V}O_{2max}$], em comparação com condições mais frias [18°C, 64°F]. No entanto, quando a temperatura ambiental foi elevada [40°C, 104°F], tanto o exercício com intensidade moderada [~69% da $\dot{V}O_{2max}$] quanto o de alta intensidade [~81% da $\dot{V}O_{2max}$] aumentaram a oxidação de carboidratos, em comparação com condições mais frias [Maund et al., 2020].

Ao contrário dos estudos anteriores [Febbraio et al., 1994a, b; Hargreaves et al., 1996], Charoensap et al. [2023] mostraram que exercícios de ciclismo no calor levaram a uma redução na utilização de carboidratos. Contudo, apesar do exercício apresentar frequências cardíacas semelhantes, a potência gerada também foi reduzida [Charoensap et al., 2023], solidificando ainda mais o papel da intensidade em mediar alterações induzidas pelo ambiente no metabolismo dos exercícios. Em conjunto com a temperatura ambiental e a intensidade do exercício, a maior necessidade de carboidratos durante exercícios realizados no calor pode ser dependente de alterações na temperatura corporal central, com o aumento de 0,5°C ou mais na temperatura central levando a um aumento no uso de carboidratos [Febbraio, 2000; Febbraio et al., 1994a]. Além disso, a desidratação induzida pelo calor pode ter um papel na utilização de substrato. Logan-Sprenger et al. [2012, 2013, 2015] mostraram que a restrição de líquidos durante exercícios de ciclismo, gerando perdas maiores que 2% da MC, levou a maiores taxas de oxidação de carboidratos e maior utilização de glicogênio muscular, o que coincidiu com

aumentos maiores que 0,5 °C na temperatura corporal central, em comparação com condições de euidratação. A maior dependência da utilização de carboidratos durante o exercício no calor pode ocorrer devido a alterações no metabolismo da musculatura esquelética.

Trabalhos anteriores evidenciaram uma redução no conteúdo de glicogênio muscular na musculatura esquelética após a prática de exercícios no calor [Febbraio, 2000; Febbraio et al., 1994a; Fink et al., 1975], possivelmente devido a um aumento nos níveis sistêmicos de epinefrina [Febbraio et al., 1994]. No entanto, apesar da maior dependência de carboidratos durante o exercício, relatórios anteriores revelaram que os níveis de glicogênio muscular não são severamente depletados após exercício fatigante realizado no calor [Parkin et al., 1999], sugerindo que a disponibilidade de substrato não está limitando a performance sob essas condições ambientais. O exercício realizado no calor também mostrou aumentos na concentração de lactato muscular e sanguíneo, [Febbraio, 2000; Febbraio et al., 1994a; Fink et al., 1975] e maiores níveis musculares de monofosfato de inosina (IMP) no ponto de fadiga [Febbraio, 2000; Parkin et al., 1999]. Um aumento na concentração sanguínea de lactato sugeriria uma discrepância entre a formação de lactato por meio da quebra de glicogênio e a utilização de lactato pela mitocôndria [Brooks, 2020]. Além disso, o acúmulo de IMP é indicativo de fluxo reduzido via ciclo do ácido tricarboxílico [Ciclo de Krebs] e menor produção de energia por meio da fosforilação mitocondrial oxidativa [Sahlin et al., 1990]. Estudos anteriores indicaram que a eficiência da mitocôndria em produzir energia é prejudicada em temperaturas acima de 40°C [104°F] [Brooks et al., 1971; Willis & Jackman, 1994]. Isso é importante, à medida que Parkin et al. [1999] mostraram que a fadiga durante o exercício realizado no calor coincidiu com temperaturas musculares maiores que 40°C [104°F]. De maneira conjunta, esses dados sugerem que alterações no metabolismo de substratos na musculatura podem ser responsáveis por uma utilização maior de carboidratos pelo corpo inteiro durante o exercício praticado no calor, com reduções associadas nos estoques musculares de glicogênio e menor função energética mitocondrial, levando à fadiga sob essas condições ambientais.

RECOMENDAÇÕES PARA A INGESTÃO DE LÍQUIDOS

Para mitigar as alterações fisiológicas causadas pela hipoidratação durante as sessões prolongadas de ciclismo no calor, é imperativo repor adequadamente o líquido e os eletrólitos perdidos pela transpiração. A média da taxa de sudorese de corpo inteiro relatada em um estudo com 255 atletas de endurance em ambientes quentes e úmidos [29°C, 84°F; 56% de UR] foi de aproximadamente 1,28 L/h, contudo, alguns atletas apresentaram taxas de sudorese de até 3 a 4 L/h [Barnes et al., 2019]. Além disso, em um atleta

individualmente, isso pode variar dependendo da intensidade do exercício, das condições ambientais, do nível de treino e da aclimação ao calor e da vestimenta utilizada [Baker, 2019]. Em um cenário perfeito, atletas seriam capazes de limitar suas perdas de suor durante o exercício para menos de 2% da MC. Contudo, desafios logísticos [como, carregar líquido suficiente], o estresse gastrointestinal [GI] e a palatabilidade da bebida podem operar como barreiras no processo de reposição de líquidos [Passe, 2001]. Portanto, é comum para atletas de endurance apresentarem desidratação gradual involuntária, encontrando-se hipoidratados ao final da competição [Sharwood et al., 2004]. No entanto, o ciclismo apresenta diversas situações nas quais a desidratação é provável de acontecer, portanto é importante considerar estratégias de hidratação adequadas [como, horário, quantidade e tipo de líquido a ser consumido] para limitar qualquer possível redução na performance.

Para se atingir uma hidratação apropriada, o Colégio Americano de Medicina Esportiva [ACSM] sugere que os atletas consumam um volume de líquido equivalente a 5 a 10 ml/kg de MC durante 2 a 4 horas anteriores à sessão de exercício [Thomas et al., 2016]. Durante o exercício, é recomendado que atletas consumam líquidos em uma taxa suficiente para prevenir um déficit maior que 2% da MC e para evitar uma ingestão excessiva, levando a ganho de massa corporal [Thomas et al., 2016]. A inclusão de sódio em uma bebida para a reposição de líquidos pode aumentar a ingestão voluntária de líquidos por meio da melhora da palatabilidade da bebida, o que pode auxiliar os atletas a manterem o volume de plasma durante as sessões prolongadas de exercícios no calor [Clapp et al., 2000; Wemple et al., 1997]. Curiosamente, Wemple et al. [1997] encontraram que bebidas contendo ≥ 50 mmol/L de sódio reduziram a palatabilidade e a ingestão voluntária de líquidos e, portanto, deveriam ser evitadas. Pesquisas anteriores sugeriram que atletas de endurance deveriam consumir bebidas com concentrações de sódio entre 30 a 50 mmol/L durante sessões prolongadas de exercícios (> 3 horas) [Maughan, 1991], no entanto, a quantidade de sódio que os atletas deveriam ingerir como parte da sua estratégia de reidratação pode variar, especialmente para atletas com altas taxas de sudorese, maiores que 1,2 L/h, ou indivíduos que possuem grande quantidade de sódio no suor [por exemplo, > 60 mmol/L de sódio no suor do corpo inteiro] [Thomas et al., 2016]. No pós-exercício, os atletas deveriam focar no consumo de água e sódio em uma taxa moderada, contabilizando perdas urinárias adicionais e perdas de suor após o exercício [Sawka et al., 2007]. Para isso, a ACSM recomenda que atletas consumam de 1,25 a 1,5 L/kg de qualquer déficit remanescente da MC [Thomas et al., 2016]. Por último, a presença de carboidratos em uma bebida esportiva é importante para o estímulo da absorção de água no intestino. Pesquisas anteriores indicaram que o tipo de carboidrato [Jentjens et al., 2006; Shi & Passe,

2010] e a concentração [Jeukendrup et al., 2009; Murray et al., 1999] podem impactar a absorção de líquidos. Especificamente, a presença de 1 a 3% de carboidratos em uma bebida esportiva pode impactar positivamente a taxa de entrega de líquidos, mas a entrega de líquidos pode ser comprometida quando bebidas com concentração de carboidratos maior que 6% são ingeridas [Jeukendrup et al., 2009]. Uma vez que o líquido seja absorvido, é imperativo que seja retido no sangue para manter o volume do plasma, promovendo as funções cardiovascular e termorregulatória adequadas. Dessa forma, há duas maneiras principais de se promover a retenção de líquidos: 1) Estimulando a reabsorção renal de água; e 2) retardando o aparecimento de líquido no sistema circulatório. Enquanto a primeira é amplamente regulada pela concentração de sódio no plasma, a última pode ser modificada pelo aumento da densidade energética das bebidas esportivas. Diversos estudos relataram que bebidas esportivas contendo 6 a 12% de carboidratos podem promover maior retenção de líquido, após desidratação de aproximadamente 2 a 3% promovida pelo exercício, comparando-se com bebidas com quantidade semelhante de eletrólitos [Baker & Jeukendrup, 2014]. Contudo, pesquisas futuras são necessárias para se determinar o(s) exato(s) mecanismo(s) envolvido(s) nessa interação. De modo geral, nenhuma estratégia individual de reidratação será correta para todos os atletas, então diferenças nas condições ambientais, taxas de sudorese, MC e intensidade e duração do exercício deveriam sempre ser consideradas [Armstrong, 2021]. Além disso, é importante para os atletas experimentarem diversas estratégias de reidratação durante as sessões de treinamento, antes de as utilizarem durante as competições em condições ambientais quentes. Isso irá fornecer ao atleta tempo para contabilizar suas taxas de sudorese individuais, sua tolerância intestinal, os desafios logísticos e a necessidade de consumir outros nutrientes [como, carboidratos e eletrólitos] para maximizar sua performance.

CONSIDERAÇÕES NUTRICIONAIS

Os benefícios de se consumir carboidratos como fonte de energia para a musculatura contrátil são conhecidos desde o início do século 20 [Krogh & Lindhard, 1920], com os estudos de referência nos anos 80 mostrando uma relação direta entre a ingestão de carboidratos e a capacidade de exercício [Coggan & Coyle, 1987; Coyle et al., 1983]. Ao fornecer uma fonte externa [exógena] de carboidratos, fontes internas de carboidratos [endógenas], como o glicogênio muscular e do fígado, podem ser preservadas, ajudando a fornecer uma fonte constante de carboidratos, prevenindo uma queda na concentração de glicose sanguínea durante competições. De maneira conjunta, isso levou à formulação de produtos contendo carboidratos destinados a otimizar a performance no exercício, com uma variedade [como, bebidas, gel, barras]

disponível comercialmente para atender as necessidades práticas de um ciclista [Pfeiffer et al., 2012]. Com eventos de ciclismo de endurance com duração maior que 1 hora, a ingestão de carboidratos é crítica para a performance. A ACSM recomendou que atletas consumam 30 a 60 g de carboidrato/hora [Thomas et al., 2016], tendo como base para essa recomendação as pesquisas evidenciando que a absorção intestinal de fontes de um único tipo de carboidrato é limitada a cerca de 1 g/minuto [Jeukendrup, 2014; Jeukendrup & Jentjens, 2000]. No entanto, a combinação de fontes de diferentes tipos de carboidratos, como glicose e frutose, absorvidas separadamente no intestino por meio de diferentes transportadores [carboidratos com múltiplos transportadores], mostrou aumentar a utilização de carboidratos exógenos para > 1 g/min. Isso levou os ciclistas a aumentarem a ingestão de carboidratos (> 90 g/h de carboidratos com múltiplos transportadores) durante corridas de longa duração com mais de 4 horas [Jeukendrup, 2014; Stellingwerff & Cox, 2014], com dados recentes sugerindo que a ingestão de carboidratos de aproximadamente 120 g/h de fontes mistas de glicose e frutose utilizando diferentes tipos de produtos é tolerável para ciclistas experientes [Harris et al., 2022].

Enquanto o impacto do exercício realizado no calor na utilização de carboidratos endógenos é bem estabelecido, poucos estudos examinaram como o calor afeta o uso de carboidratos exógenos durante o exercício. Esse número reduzido de estudos indicou que a composição de uma bebida contendo carboidratos pode impactar a disponibilidade e o uso de carboidratos como fonte de energia para o exercício de ciclismo no calor. Jentjens et al. [2002] relataram que a oxidação exógena de glicose de uma bebida com 8% de glicose foi reduzida a cerca de 0,7 g/min durante prática de ciclismo no calor, aproximadamente 10% mais baixa àquela vista durante uma sessão de ciclismo semelhante em condições mais frias. Em comparação às fontes contendo um único tipo de carboidrato, carboidratos com múltiplos transportadores foram mostrados aumentar a utilização de carboidratos ingeridos durante atividade de ciclismo realizada no calor. Em um acompanhamento do seu estudo de 2002, Jentjens et al. [2006] mostraram que ingerir uma bebida contendo 2:1 de glicose:frutose, aumentou a oxidação de carboidratos exógenos para cerca de 1,14 g/min em atividade de ciclismo no calor, 36% mais alta que a glicose isoladamente. Os autores também relataram que a utilização de carboidratos endógenos foi reduzida quando uma bebida contendo essa razão de glicose:frutose foi oferecida. Em conjunto com os benefícios metabólicos, a ingestão de uma bebida contendo carboidratos com múltiplos transportadores pode aumentar a absorção de líquidos, em comparação com uma bebida contendo fonte de um único carboidrato, contribuindo para uma melhora no balanço hídrico [Jentjens et al., 2006]. De maneira conjunta, esses estudos sugerem que fontes de carboidratos com múltiplos transportadores são

ideais para fornecer energia para a performance na atividade de ciclismo em atletas experientes em condições ambientais quentes, com a ingestão de 30 a 60 gramas/hora para etapas durando de 1 a 2,5 horas e de mais que 90 g/h, com base na tolerabilidade individual do ciclista, para etapas com duração maior que 2,5 horas [Coggan & Coyle, 1987; Coyle et al., 1983; Jeukendrup, 2014]. Pesquisas anteriores indicaram que a ingestão de carboidratos pode melhorar a capacidade de exercício no calor [Carter et al., 2003, 2005; Pitsiladis & Maughan, 1999]. A razão para essa melhora na performance do exercício não parece ser metabólica. Especificamente, alguns [Angus et al., 2001; Jentjens et al., 2002] mas não todos [Yaspelkis & Ivy, 1991] os estudos demonstraram que a utilização de glicogênio muscular permanece elevada quando se exercita no calor após a ingestão de solução contendo 6 a 8% de glicose. Adicionalmente, os benefícios dos carboidratos na atividade física realizada no calor são aparentes durante os estágios iniciais do exercício (< 1 hora de pedalada), momento em que os carboidratos ingeridos não influenciam o metabolismo muscular. Carter et al. [2003] sugeriu que os benefícios da ingestão de carboidratos na performance em atividade de ciclismo no calor podem ser causados pelos efeitos ergogênicos no sistema nervoso central [Chambers et al., 2009; Gant et al., 2010]. No entanto, os receptores e o mecanismo de ação no cérebro que mediam esses efeitos benéficos não foram identificados [Jeukendrup, 2014]. Curiosamente, estudos indicaram que um enxágue bucal com carboidratos não influenciou a performance no ciclismo no calor [Cramer et al., 2015; Watson et al., 2014]; portanto, os mecanismos pelos quais os carboidratos melhoram a performance no ciclismo, particularmente em sessões com duração menor que 1 hora, não estão claros.

OUTRAS CONSIDERAÇÕES

Aclimação ao Calor

A aclimação ao calor é desenvolvida através da exposição repetitiva às condições ambientais que elevam de maneira suficiente a temperatura corporal central e a da pele, induzindo uma transpiração profusa [Périard et al., 2015]. A intensidade, duração, frequência e número de exposições ao calor, assim como as diferenças nas condições ambientais (por exemplo, calor seco em comparação ao úmido), determinam a magnitude à qual um indivíduo se aclimatiza [Périard et al., 2015]. É amplamente aceito que a aclimação ao calor melhora a termorregulação ao aumentar a taxa de sudorese, reduzir as concentrações de sódio no suor e iniciar a transpiração em temperaturas corporais centrais mais baixas [Nielsen et al., 1997; Roberts et al., 1977; Sawka et al., 2011; Taylor, 2014]. Para manter as taxas de sudorese elevadas, estudos anteriores sugeriram que as glândulas écrinas de suor se tornam mais resistentes à fadiga [Périard et al., 2015] e os estoques corporais totais de água são aumentados em cerca

de 5–7% [Patterson et al., 2014; Wyndham et al., 1968]. Pesquisas anteriores indicaram que treinos de aclimação ao calor melhoram a $\dot{V}O_{2\max}$, o DC, e a performance em TT em ciclistas do sexo masculino com experiência em endurance [Nielsen et al., 1993; Périard et al., 2024; Sekiguchi et al., 2022]. Enquanto as alterações no DC podem se originar de um aumento na produção de aldosterona [Nielsen et al., 1993], os ganhos em métricas de performance podem parcialmente ser atribuídos à melhora no metabolismo [Young et al., 1985]. Especificamente, estudos relataram os metabolismos do corpo inteiro [Sawka et al., 1996] e da musculatura esquelética [Young et al., 1985] alterados por meio de reduções na utilização de glicogênio muscular [King et al., 1985; Kirwan et al., 1987] e na captação de oxigênio durante exercícios submáximos [Sawka et al., 1983]. Adicionalmente, estudos anteriores relataram uma redução no acúmulo de lactato no sangue e muscular durante exercícios realizados em aproximadamente 70% da $\dot{V}O_{2\max}$ [Febbraio et al., 1994a] e um aumento na potência gerada no limiar de lactato após um programa de aclimação ao calor de 10 dias realizado com ciclistas experientes [Lorenzo et al., 2010]. Ao todo, as adaptações observadas após a aclimação ao calor podem levar a um menor estresse fisiológico e melhoras no conforto e performance durante sessões prolongadas de exercício em condições ambientais quentes.

Treinamento Intestinal

Consumir as quantidades necessárias de líquidos e carboidratos para a hidratação e para a ingestão energética adequadas pode causar desconforto, estresse e distúrbios gastrointestinais, especialmente na realização de exercícios de alta intensidade ou longa duração em condições ambientais quentes [Neufer et al., 1989]. Para melhor lidar com o estresse causado pela maior ingestão de líquidos e de carboidratos, foi sugerido que os atletas participem de um treinamento intestinal para melhorar o esvaziamento gástrico e a absorção de altas cargas de carboidratos e/ou líquidos, desencadeando menos problemas GI [Jeukendrup, 2017]. Estudos anteriores investigando o treinamento intestinal para a ingestão de carboidratos mostraram efeitos semelhantes na taxa de esvaziamento gástrico, apesar das diferenças na quantidade e na duração do período de treinamento [Cox et al., 2010; Horowitz et al., 1996]. Horowitz et al. [1996] relataram que a suplementação com 440 g de glicose/dia, por 4 a 7 dias, acelerou significativamente o esvaziamento gástrico tanto para glicose quanto para a frutose em indivíduos não treinados. Além disso, quando investigaram os efeitos a longo prazo (28 dias) da suplementação com carboidratos, Cox et al. [2010] relataram melhores taxas de oxidação de carboidratos exógenos em ciclistas treinados para endurance que consumiram um adicional de 1,5 g carboidrato/kg da MC a cada hora de exercício realizado a cada dia (~8,5 g/kg/dia). De maneira conjunta, esses resultados sugerem que o treinamento intestinal adequado pode permitir

que atletas de endurance consumam bebidas esportivas com concentrações maiores de carboidratos, otimizando a absorção intestinal de líquidos e carboidratos. No entanto, o impacto do treinamento intestinal na reabsorção de carboidratos durante o exercício realizado no calor não está claro e necessita de investigação futura.

LACUNAS DO CONHECIMENTO

Apesar do conhecido impacto fisiológico do exercício no calor e as possíveis estratégias para minimizar os efeitos prejudiciais, ainda permanecem diversas questões relacionadas às pesquisas no sentido de otimizar a performance no ciclismo sob essas condições ambientais. Pesquisas anteriores sugeriram que aumentar o conteúdo de carboidratos de uma bebida pode melhorar a retenção de líquidos devido ao esvaziamento gástrico mais lento, no entanto, pesquisas futuras são necessárias para se determinar o(s) exato(s) mecanismo(s) envolvidos nessa interação. Enquanto pesquisas recentes sugerem, se bem toleradas, que cargas de carboidrato > 90 g/h sejam utilizadas durante sessões prolongadas de ciclismo (2,5 horas), o impacto da quantidade e o tipo de carboidrato (como, bebidas, gel, barras) na performance do exercício e no estresse GI em condições ambientais quentes é desconhecido. Por fim, mais estudos são necessários para entender os mecanismos que conectam a ingestão de carboidratos à melhor performance em exercícios no calor, em sessões com duração menor que 1 hora.

RESUMO

A exposição ao calor ambiental pode impactar negativamente o balanço hídrico e a utilização de energia dos ciclistas, prejudicando severamente a performance. No entanto, com uma hidratação adequada e estratégias ideais de ingestão de carboidratos, os impactos do calor extremo podem ser minimizados. Adicionalmente, estratégias de treino, como a aclimação ao calor e o treinamento intestinal, permitem ao ciclista resistir ao estresse da exposição ao calor ambiental e às maiores necessidades de líquidos e de energia, respectivamente, para melhorar ainda mais a performance. De maneira conjunta, ao entender o impacto fisiológico da exposição ao calor na performance atlética, os ciclistas e seus treinadores podem otimizar a ingestão de energia e as estratégias de treinamento personalizadas para atender às necessidades individuais durante as corridas sob condições extremas de calor.

APLICAÇÕES PRÁTICAS

- Enquanto certo grau de desidratação é esperado, atletas de endurance deveriam almejar o consumo de quantidade suficiente de uma bebida esportiva contendo eletrólitos para limitar os déficits de massa corporal em menos de 2%, especialmente quando se exercitando em condições ambientais quentes.
- Atletas deveriam ter como objetivo o consumo de 1,25–1,5 L/kg de qualquer déficit remanescente da massa corporal de uma bebida contendo eletrólitos em uma taxa de ingestão moderada no pós-exercício para restaurar a euidratação.
- Nenhuma estratégia individual de reidratação será correta para todos os atletas, então os atletas deveriam experimentar diversas estratégias de reidratação durante as sessões de treinamento, anteriormente à sua utilização durante competições realizadas no calor.
- Para maximizar a performance, ciclistas de endurance deveriam consumir uma combinação de fontes de carboidratos de múltiplos transportadores em uma taxa de ingestão de 30–60 g/h para etapas durando de 1 a 2,5 horas e maior que 90 g/hora para etapas com duração de mais de 2,5 horas.
- Com o treinamento intestinal adequado, ingestões de carboidratos de 120 g/h de fontes mistas de glicose/frutose utilizando diferentes tipos de produtos podem ser toleradas por ciclistas bem treinados.

LEITURA RECOMENDADA

Outubro de 2025

SSE #269 O Impacto da Quantidade, Qualidade, Distribuição e Matriz Alimentar das Proteínas na Síntese de Proteínas Musculares

Setembro de 2025

SSE #268 Potencializar a Performance Começa com o Sono: como a perda de sono prejudica os objetivos nutricionais

Setembro de 2025

SSE #267 Ingredientes Funcionais para o Atleta

REFERÊNCIAS

- Adams, J.D., Y. Sekiguchi, H.G. Suh, A.D. Seal, C.A. Sprong, T.W. Kirkland, and S.A. Kavouras [2018]. Dehydration impairs cycling performance, independently of thirst: A blinded study. *Med. Sci. Sports Exerc.* 50:1697–1703.
- Adams, J.D., D.M. Scott, N.A. Brand, H.G. Suh, A.D. Seal, B.P. McDermott, M.S. Ganio, and S.A. Kavouras [2019]. Mild hypohydration impairs cycle ergometry performance in the heat: A blinded study. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 29:686–695.
- Angus, D.J., M.A. Febbraio, D. Lasini, and M. Hargreaves [2001]. Effect of carbohydrate ingestion on glucose kinetics during exercise in the heat. *J. Appl. Physiol.* 90:601–605.
- Areta, J.L., E. Meehan, G. Howe, and L.M. Redman [2024]. Energetics of a world-tour female road cyclist during a multistage race [Tour de France Femmes]. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 34:253–257.
- Armstrong, L.E. [2021]. Rehydration during endurance exercise: challenges, research, options, methods. *Nutrients* 13:887.
- Armstrong, L.E., E.C. Johnson, A.L. McKenzie, L.A. Ellis, and K.H. Williamson [2015]. Ultraendurance cycling in a hot environment. *J. Strength Cond. Res.* 29:869–876.
- Baker, L.B. [2019]. Physiology of sweat gland function: The roles of sweating and sweat composition in human health. *Temperature* 6:211–259.
- Baker, L.B., and A.E. Jeukendrup [2014]. Optimal composition of fluid-replacement beverages. *Compr. Physiol.* 4:575–620].
- Barnes, K.A., M.L. Anderson, J.R. Stofan, K.J. Dalrymple, A.J. Reimel, T.J. Roberts, R.K. Randell, C.T. Ungaro, and L.B. Baker [2019]. Normative data for sweating rate, sweat sodium concentration, and sweat sodium loss in athletes: An update and analysis by sport. *J. Sports Sci.* 37:2356–2366.
- Barranco-Gil, D., X. Muriel, A. Lucia, M.J. Joyner, C.A. DeSouza, and P.L. Valenzuela [2024]. The Tour de France, also possible for mortals? A comparison of a recreational and a World Tour cyclist. *J. Appl. Physiol.* 136:432–436.
- Brooks, G.A. [2020]. Lactate as a fulcrum of metabolism. *Redox Biol.* 35:101454.
- Brooks, G.A., K.J. Hittelman, J.A. Faulkner, and R.E. Beyer [1971]. Temperature, skeletal muscle mitochondrial functions, and oxygen debt. *Am. J. Physiol.* 220:1053–1059.
- Carter, J., A.E. Jeukendrup, T. Mundel, and D.A. Jones [2003]. Carbohydrate supplementation improves moderate

- and high-intensity exercise in the heat. *Eur. J. Physiol.* 446:211–219.
- Carter, J., A.E. Jeukendrup, and D.A. Jones [2005]. The effect of sweetness on the efficacy of carbohydrate supplementation during exercise in the heat. *Can. J. Appl. Physiol.* 30:379–391.
- Chambers, E.S., M.W. Bridge, and D.A. Jones. [2009]. Carbohydrate sensing in the human mouth: effects on exercise performance and brain activity. *J. Physiol.* 587:1779–1794.
- Charoensap, T., A.E. Kilding, and E. Maunder [2023]. Carbohydrate, but not fat, oxidation is reduced during moderate-intensity exercise performed in 33 vs. 18 °C at matched heart rates. *Eur. J. Appl. Physiol.* 123:2073–2085.
- Cheuvront, S.N., and R.W. Kenefick [2014]. Dehydration: Physiology, assessment, and performance. *Compr. Physiol.* 4:257–285.
- Cheuvront, S.N., R. Carter, and M.N. Sawka [2003]. Fluid balance and endurance exercise performance. *Curr. Sports Med. Rep.* 2:202–208.
- Clapp, A.J., P.A. Bishop, J.F. Smith, and E.R. Mansfield [2000]. Effects of carbohydrate-electrolyte content of beverages on voluntary hydration in a simulated industrial environment. *Am. Indust. Hygiene Assoc.* 61:692–699.
- Coggan, A.R., and E.F. Coyle [1987]. Reversal of fatigue during prolonged exercise by carbohydrate infusion or ingestion. *J. Appl. Physiol.* 63:2388–2395.
- Cox, G.R., S.A. Clark, A.J. Cox, S.L. Halson, M. Hargreaves, J.A. Hawley, N. Jeacocke, R.J. Snow, W.K. Yeo, and L.M. Burke [2010]. Daily training with high carbohydrate availability increases exogenous carbohydrate oxidation during endurance cycling. *J. Appl. Physiol.* 109:126–134.
- Coyle, E.F., J.M. Hagberg, B.F. Hurley, W.H. Martin, A.A. Ehsani, and J.O. Holloszy [1983]. Carbohydrate feeding during prolonged strenuous exercise can delay fatigue. *J. Appl. Physiol.* 55:230–235.
- Cramer, M.N., M.W. Thompson, and J.D. Périard [2015]. Thermal and cardiovascular strain mitigate the potential benefit of carbohydrate mouth rinse during self-paced exercise in the heat. *Front. Physiol.* 6:354.
- Febbraio, M.A. [2000]. Does muscle function and metabolism affect exercise performance in the heat? *Exerc. Sport Sci. Rev.* 28:171–176.
- Febbraio, M.A., R.J. Snow, M. Hargreaves, C.G. Stathis, I.K. Martin, and M.F. Carey [1994a]. Muscle metabolism during exercise and heat stress in trained men: Effect of acclimation. *J. Appl. Physiol.* 76:589–597.
- Febbraio, M.A., R.J. Snow, C.G. Stathis, M. Hargreaves, and M.F. Carey [1994b]. Effect of heat stress on muscle energy metabolism during exercise. *J. Appl. Physiol.* 77:2827–2831.
- Fink, W.J., D.L. Costill, and P.J. Van Handel [1975]. Leg muscle metabolism during exercise in the heat and cold. *Eur. J. Appl. Physiol.* 34:183–190.
- Funnell, M.P., S.A. Mears, K. Bergin-Taylor, and L.J. James [2019]. Blinded and unblinded hypohydration similarly impair cycling time trial performance in the heat in trained cyclists. *J. Appl. Physiol.* 126:870–879.
- Gant, N., C.M. Stinear, and W.D. Byblow [2010]. Carbohydrate in the mouth immediately facilitates motor output. *Brain Res.* 1350:151–158.
- Gonzalez-Alonso, J., R. Mora-Rodriguez, P.R. Below, and E.F. Coyle [1995]. Dehydration reduces cardiac output and increases systemic and cutaneous vascular resistance during exercise. *J. Appl. Physiol.* 79:1487–1496.
- González-Alonso, J., R. Mora-Rodríguez, P.R. Below, and E.F. Coyle [1997]. Dehydration markedly impairs cardiovascular function in hyperthermic endurance athletes during exercise. *J. Appl. Physiol.* 82:1229–1236.
- Hargreaves, M., and L.L. Spriet [2020]. Skeletal muscle energy metabolism during exercise. *Nat. Metab.* 2:817–828.
- Hargreaves, M., D. Angus, K. Howlett, N.M. Conus, and M. Febbraio [1996]. Effect of heat stress on glucose kinetics during exercise. *J. Appl. Physiol.* 81:1594–1597.
- Hawley, J.A., and J.J. Leckey [2015]. Carbohydrate dependence during prolonged, intense endurance exercise. *Sports Med.* 45[Suppl 1]: 5–12.
- Hearris, M.A., J.N. Pugh, C. Langan-Evans, S.J. Mann, L. Burke, T. Stellingwerf, J.T. Gonzalez, and J.P. Morton [2022].

- 13C-glucose-fructose labeling reveals comparable exogenous CHO oxidation during exercise when consuming 120 g/h in fluid, gel, jelly chew, or coingestion. *J. Appl. Physiol.* 132:1394–1406.
- Horowitz, M., K.M. Cunningham, J.M. Wishart, K.L. Jones, and N.W. Read [1996]. The effect of short-term dietary supplementation with glucose on gastric emptying of glucose and fructose and oral glucose tolerance in normal subjects. *Diabetologia* 39:481–486.
- Jay, O., J.D. Périard, B. Clark, L. Hunt, H. Ren, H.G. Suh, R.R. Gonzalez, and M.N. Sawka [2024]. Whole body sweat rate prediction: outdoor running and cycling exercise. *J. Appl. Physiol.* 136:1478–1487.
- Jentjens, R.L., A.J.M. Wagenmakers, and A.E. Jeukendrup [2002]. Heat stress increases muscle glycogen use but reduces the oxidation of ingested carbohydrates during exercise. *J. Appl. Physiol.* 92:1562–1572.
- Jentjens, R.L. K. Underwood, J. Achten, K. Currell, C.H. Mann, and A.E. Jeukendrup [2006]. Exogenous carbohydrate oxidation rates are elevated after combined ingestion of glucose and fructose during exercise in the heat. *J. Appl. Physiol.* 100:807–816.
- Jeukendrup, A.E. [2014]. A step towards personalized sports nutrition: carbohydrate intake during exercise. *Sports Med.* 44[Suppl 1]:S25–S33.
- Jeukendrup, A.E. [2017]. Training the gut for athletes. *Sports Med.* 47[Suppl 1]:101–110.
- Jeukendrup, A.E., and R. Jentjens [2000]. Oxidation of carbohydrate feedings during prolonged exercise: current thoughts, guidelines and directions for future research. *Sports Med.* 29:407–424.
- Jeukendrup, A.E., K. Currell, J. Clarke, J. Cole, and A.K. Blannin [2009]. Effect of beverage glucose and sodium content on fluid delivery. *Nutr. Metab.* 6:9.
- Kenefick, R.W., S.N. Cheuvront, L.J. Palombo, B.R. Ely, and M.N. Sawka [2010]. Skin temperature modifies the impact of hypohydration on aerobic performance. *J. Appl. Physiol.* 109:79–86.
- King, D.S., D.L. Costill, W.J. Fink, M. Hargreaves, and R.A. Fielding [1985]. Muscle metabolism during exercise in the heat in unacclimatized and acclimatized humans. *J. Appl. Physiol.* 59:1350–1354.
- Kirwan, J.P., D.L. Costill, H. Kuipers, M.J. Burrell, W.J. Fink, J.E. Kovalski, and R.A. Fielding [1987]. Substrate utilization in leg muscle of men after heat acclimation. *J. Appl. Physiol.* 63:31–35.
- Krogh, A., and J. Lindhard [1920]. The relative value of fat and carbohydrate as sources of muscular energy: With appendices on the correlation between standard metabolism and the respiratory quotient during rest and work. *Biochem. J.* 14:290–363.
- Logan-Sprenger, H.M., G.J.F. Heigenhauser, K.J. Killian, and L.L. Spriet [2012]. Effects of dehydration during cycling on skeletal muscle metabolism in females. *Med. Sci. Sports Exerc.* 44:1949–1957.
- Logan-Sprenger, H.M., G.J.F. Heigenhauser, G.L. Jones, and L.L. Spriet. [2013]. Increase in skeletal muscle glycogenolysis and perceived exertion with progressive dehydration during cycling in hydrated men. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 23 :220–229.
- Logan-Sprenger, H.M., G.J.F. Heigenhauser, G.L. Jones, and I.L. Spriet [2015]. The effect of dehydration on muscle metabolism and time trial performance during prolonged cycling in males. *Physiol. Rep.* 3:e12483.
- Lorenzo, S., J.R. Halliwill, M.N. Sawka, and C.T. Minson [2010]. Heat acclimation improves exercise performance. *J. Appl. Physiol.* 109:1140–1147.
- Maughan, R.J. [1991]. Fluid and electrolyte loss and replacement in exercise. *J. Sports Sci.* 9:117–142.
- Maunder, E.D., D.J. Plews, F. Merien, and A.E. Kilding [2020]. Exercise intensity regulates the effect of heat stress on substrate oxidation rates during exercise. *Eur. J. Sport Sci.* 20:935–943.
- Sports Science Exchange [2025] Vol. 38, No. 262, 1– 76
 Montain, S.J., and E.F. Coyle [1992]. Influence of graded dehydration on hyperthermia and cardiovascular drift during exercise. *J. Appl. Physiol.* 73:1340–1350.
- Murray, R., W. Bartoli, J. Stofan, M. Horn, and D. Eddy [1999]. A Comparison of the gastric emptying characteristics of selected sports drinks. *Int. J. Sport Nutr.* 9:263–274.
- Neufer, P.D., A.J. Young, and M.N. Sawka [1989]. Gastric emptying during exercise: effects of heat stress and hypohydration. *Eur. J. Appl. Physiol.* 58:433–439.

- Nielsen, B., J.R. Hales, S. Strange, N.J. Christensen, J. Warberg, and B. Saltin [1993]. Human circulatory and thermoregulatory adaptations with heat acclimation and exercise in a hot, dry environment. *J. Physiol.* 460:467–485.
- Nielsen, B., S. Strange, N.J. Christensen, J. Warberg, and B. Saltin [1997]. Acute and adaptive responses in humans to exercise in a warm, humid environment. *Pflug. Arch.* 434:49–56.
- O'Brien, M.J., C.A. Viguie, R.S. Mazzeo, and G.A. Brooks [1993]. Carbohydrate dependence during marathon running. *Med. Sci. Sports Exerc.* 25:1009–1017.
- Parkin, J.M., M.F. Carey, S. Zhao, and M.A. Febbraio [1999]. Effect of ambient Temperature on human skeletal muscle metabolism during fatiguing submaximal exercise. *J. Appl. Physiol.* 86:902–908.
- Passe, D.H. [2001]. Physiological and psychological determinants of fluid intake. In R.J. Maughan & R. Murray [Eds.], *Sports Drinks: Basic Science and Practical Aspects* (pp. 45–87). CRC Press.
- Patterson, M.J., J.M. Stocks, and N.A.S. Taylor [2014]. Whole-body fluid distribution in humans during dehydration and recovery, before and after humid-heat acclimation induced using controlled hyperthermia. *Acta Physiol.* 210:899–912.
- Périard, J.D., S. Racinais, and M.N. Sawka [2015]. Adaptations and mechanisms of human heat acclimation: Applications for competitive athletes and sports. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 25(Suppl 1):20–38.
- Périard, J.D., D. Nichols, G. Travers, S. Cocking, N. Townsend, H.A. Brown, and S. Racinais [2024]. Impact of exercise heat acclimation on performance in hot, cool and hypoxic conditions. *J. Sci. Sport Exerc.* 6 :275–287.
- Pfeiffer, B., T. Stellingwerff, A.B. Hodgson, R. Randell, K. Pöttgen, P. Res, and A.E. Jeukendrup [2012]. Nutritional intake and gastrointestinal problems during competitive endurance events. *Med. Sci. Sports Exerc.* 44:344–351.
- Pitsiladis, Y.P., and R.J. Maughan [1999]. The effects of exercise and diet manipulation on the capacity to perform prolonged exercise in the heat and in the cold in trained humans. *J. Physiol.* 517: 919–930.
- Roberts, M.F., C.B. Wenger, J.A. Stolwijk, and E.R. Nadel [1977]. Skin blood flow and sweating changes following exercise training and heat acclimation. *J. Appl. Physiol.* 43:133–137.
- Romijn, J.A., E.F. Coyle, L.S. Sidossis, A. Gastaldelli, J.F. Horowitz, E. Endert, and R.R. Wolfe [1993]. Regulation of endogenous fat and carbohydrate metabolism in relation to exercise intensity and duration. *Am. J. Physiol.* 265:E380–E391.
- Sahlin, K., A. Katz, and S. Broberg [1990]. Tricarboxylic acid cycle intermediates in human muscle during prolonged exercise. *Am. J. Physiol.* 259:C834–C841.
- Sawka, M.N., K.B. Pandolf, B.A. Avellini, and Y. Shapiro [1983]. Does heat acclimation lower the rate of metabolism elicited by muscular exercise? *Aviat. Space Environ. Med.* 54:27–31.
- Sawka, M.N., A.J. Young, R.P. Francesconi, S.R. Muza, and K.B. Pandolf [1985]. Thermoregulatory and blood responses during exercise at graded hypohydration levels. *J. Appl. Physiol.* 59:1394–1401.
- Sawka, M.N., C.B. Wenger, and K.B. Pandolf. [1996]. Thermoregulatory responses to acute exercise-heat stress and heat acclimation. *Compr. Physiol.* (pp.157–185). Wiley.
- Sawka, M.N., L.M. Burke, E.R. Eichner, R.J. Maughan, S.J. Montain, and N.S. Stachenfeld [2007]. Exercise and fluid replacement. *Med. Sci. Sports Exerc.* 39:377–390.
- Sawka, M.N., L.R. Leon, S.J. Montain, and L.A. Sanna [2011]. Integrated physiological mechanisms of exercise performance, adaptation, and maladaptation to heat stress. *Compr. Physiol.* 1:1883–1928.
- Sawka, M.N., S.N. Cheuvront, and R.W. Kenefick [2015]. Hypohydration and human performance: Impact of environment and physiological mechanisms. *Sports Med.* 45:51–60.
- Sekiguchi, Y., C.L. Benjamin, C.N. Manning, J.F. Struder, L.E. Armstrong, E.C. Lee, R.A. Huggins, R.L. Stearns, L.J. Distefano, and D.J. Casa [2022]. Effects of heat acclimatization, heat acclimation, and intermittent exercise heat training on time-trial performance. *Sports Health* 14:694–701.
- Sharwood, K.A., M. Collins, J.H. Goedecke, G. Wilson, and T.D. Noakes [2004]. Weight changes, medical complications, and performance during an Ironman triathlon. *Br. J. Sports Med.* 38:718–724.

- Shi, X., and D.H. Passe [2010]. Water and solute absorption from carbohydrate-electrolyte solutions in the human proximal small intestine: A review and statistical analysis. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 20:427–442.
- Stellingwerff, T., and G.R. Cox [2014]. Systematic review: Carbohydrate supplementation on exercise performance or capacity of varying durations. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 39:998–1011.
- Taylor, N.A.S. [2014]. Human heat adaptation. *Compr. Physiol.* 4:325–365. Thomas, D.T., K.A. Erdman, and L.M. Burke. [2016]. American College of Sports Medicine joint position statement. nutrition and athletic performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 48:543–568.
- Van Hooren, B., M. Cox, G. Rietjens, and G. Plasqui [2023]. Determination of energy expenditure in professional cyclists using power data: Validation against doubly labeled water. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 33: 407–419.
- Watanabe, K., E.J. Stöhr, K. Akiyama, S. Watanabe, and J. González-Alonso [2020]. Dehydration reduces stroke volume and cardiac output during exercise because of impaired cardiac filling and venous return, not left ventricular function. *Physiol. Rep.* 8:e14483.
- Watson, P., D. Nichols, and P. Corderly [2014]. Mouth rinsing with a carbohydrate solution does not influence cycle time trial performance in the heat. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 39 :1064–1069.
- Wemple, R.D., T.S. Morocco, and G.W. Mack [1997]. Influence of sodium replacement on fluid ingestion following exercise-induced dehydration. *Int. J. Sport Nutr.* 7:104–116.
- Willis, W.T., and M.R. Jackman [1994]. Mitochondrial function during heavy exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 26:1347–1353.
- Wyndham, C.H., A.J. Benade, C.G. Williams, N.B. Strydom, A. Goldin, and A.J. Heyns [1968]. Changes in central circulation and body fluid spaces during acclimatization to heat. *J. Appl. Physiol.* 25:586–593.
- Yaspelkis, B.B., and J.L. Ivy [1991]. Effect of carbohydrate supplements and water on exercise metabolism in the heat. *J. Appl. Physiol.* 71:680–687.
- Young, A.J., M.N. Sawka, L. Levine, B.S. Cadarette, and K.B. Pandolf [1985]. Skeletal muscle metabolism during exercise is influenced by heat acclimation. *J. Appl. Physiol.* 59:1929–1935