



NITRATO DE LA DIETA Y RENDIMIENTO FÍSICO: NUEVAS IDEAS PARA EL USO DE LA REMOLACHA

Andrew M. Jones, PhD | Departamento de Deportes y Ciencias de la Salud, Universidad de Exeter, Reino Unido.

PUNTOS CLAVE

- El óxido nítrico (ON) es una molécula gaseosa esencial para la vida misma. Debe producirse continuamente para apoyar una amplia variedad de procesos fisiológicos, incluidos los relacionados con la contracción muscular, el metabolismo y el flujo sanguíneo.
- Hay dos vías complementarias para la producción de ON: una es enzimática y requiere el aminoácido arginina y oxígeno. La otra vía denominada nitrato-nitrito-ON, depende de la disponibilidad de nitrato. El nitrato se produce endógenamente, pero también puede ingresar a nuestro cuerpo a través de los alimentos para aumentar nuestras reservas de nitrato.
- Cuando se consumen alimentos ricos en nitratos (como las verduras de hoja verde) o suplementos, el nitrato ingerido se convierte principalmente en nitrito bioactivo por las bacterias que residen en la boca. Este nitrito ingresa a la circulación y puede reducirse fácilmente a ON donde sea necesario, como en áreas donde la disponibilidad de oxígeno es baja, incluso en la contracción del músculo esquelético.
- Los primeros estudios indicaron que la suplementación con nitrato en la dieta redujo el costo de oxígeno del ejercicio submáximo y mejoró el rendimiento del ejercicio de resistencia. Sin embargo, estudios más recientes sugieren que estos efectos solo son evidentes en atletas de resistencia que no son de élite.
- Más recientemente, se ha demostrado que el nitrato de la dieta puede ser ergogénico durante las actividades que requieren una gran producción de potencia muscular y durante los sprints únicos y repetidos. La mejora de la función contráctil del músculo por el nitrato puede estar relacionada con los efectos sobre el manejo del calcio muscular.
- Existe evidencia de que el músculo esquelético puede servir como sitio de almacenamiento de nitrato y que los niveles de nitrato muscular son sensibles a la alimentación y al ejercicio.
- La suplementación con nitrato puede tener aplicaciones tanto en ejercicios de baja como de alta intensidad, así como en diferentes deportes de equipo. Sin embargo, la eficacia de la suplementación con nitrato depende de varios factores importantes, incluida la dosis administrada y el momento de la ingestión en relación con el inicio del ejercicio.

INTRODUCCIÓN

Los atletas, tanto de élite como recreativos, están naturalmente interesados en mejorar su rendimiento físico. Si bien el consumo de una dieta equilibrada es importante para el mantenimiento de la salud general y para tener energía y recuperarse del entrenamiento, muchos atletas también usan suplementos dietéticos con el objetivo de mejorar el rendimiento durante la competencia. Ejemplos de estos suplementos incluyen cafeína, creatina, bicarbonato de sodio, beta alanina y, más recientemente, nitrato inorgánico (ON₃⁻) (Maughan et al., 2011). La evidencia sobre la eficacia de las ayudas ergogénicas nutricionales es notablemente mixta y el nitrato no es una excepción. Sin embargo, metanálisis recientes respaldan la sugerencia de que el nitrato alimentario, que normalmente los atletas ingieren en forma de jugo de remolacha (betabel), tiene el potencial de mejorar el rendimiento en varios tipos de actividades deportivas y de ejercicio (McMahon et al., 2017; Pawlak -Chaouch et al., 2016; Senefeld et al., 2020). Además, a diferencia de otros suplementos que son principalmente valiosos para los atletas, la suplementación con nitrato también puede brindar beneficios para la salud cardiovascular al público en general (no deportistas) a través de sus efectos bien descritos sobre la reducción de la presión arterial en reposo.

El propósito de este artículo de Sports Science Exchange es resaltar los avances recientes en nuestra comprensión de los efectos de la suplementación con nitrato de la dieta sobre el rendimiento físico. El artículo se centrará en el papel del microbioma oral en la activación

del nitrato ingerido, discutirá la posibilidad de que el músculo esquelético sea un sitio importante para el almacenamiento de nitrato y revisará nueva información sobre las situaciones potenciales en las que la suplementación con nitrato puede ser ergogénica. En particular, mientras que las observaciones iniciales de que el nitrato podría reducir el costo de oxígeno del movimiento (es decir, mejorar la economía del ejercicio) apuntaban a aplicaciones en deportes de resistencia, hallazgos más recientes sugieren un papel potencialmente importante para el nitrato en deportes de velocidad, velocidad múltiple y en actividades que requieren alta generación de potencia muscular.

BIOLOGÍA BÁSICA DE LOS NITRITOS, NITRATOS Y EL ÓXIDO NÍTRICO

El óxido nítrico (ON) es una molécula gaseosa de señalización que regula una variedad de funciones fisiológicas esenciales para mantener la integridad metabólica, neurológica y cardiovascular. Los efectos del ON se describieron por primera vez en la vasculatura, y varias décadas de investigación han confirmado que el ON juega un papel esencial en la vasodilatación y, por lo tanto, en el control de la presión arterial y el flujo sanguíneo tisular (Kapil et al., 2013). Sin embargo, ahora se sabe que el ON tiene muchos otros efectos fisiológicos, incluidos, por ejemplo, en procesos tan diversos como la neurotransmisión, la defensa inmunitaria, la respiración mitocondrial y la función contráctil del músculo esquelético. Dado que el ON tiene una vida media extremadamente corta, quizás de solo unos pocos

milisegundos en los tejidos biológicos, es esencial que se produzca de forma continua para apoyar estos procesos fisiológicos.

La mayoría de los tejidos contienen una o más isoformas de la enzima óxido nítrico sintasa (ONS), que cataliza la producción de ON mediante la conversión del aminoácido semi esencial L-arginina en L-citrulina. Esta reacción requiere la presencia de oxígeno, y el ON que se produce puede oxidarse posteriormente para formar nitrato. Cuando la disponibilidad de oxígeno es limitada, la generación de ON derivada de ONS puede inhibirse o deteriorarse. Hace relativamente poco tiempo, se descubrió que, en lugar de ser un producto inerte de la oxidación del ON, el nitrato puede reducirse en circunstancias fisiológicas apropiadas de nuevo a nitrito (ON_2^-) y luego a ON (Cosby et al., 2003). Es importante destacar que esta vía complementaria de generación de nitrato-nitrito-ON no requiere la presencia de oxígeno y, de hecho, se ve facilitada por un pH más ácido y una menor tensión de oxígeno. De esta forma, se puede producir ON y se pueden mantener la vasodilatación y otros efectos del ON en una amplia gama de estados de oxigenación tisular. De hecho, dadas las condiciones fisiológicas predominantes, la vía nitrato-nitrito-ON puede ser el mecanismo favorecido para la producción de ON en el músculo esquelético.

La generación continua de ON es esencial para el mantenimiento de la función celular y la salud en general. Esto ha producido iniciativas para mejorar la disponibilidad de ON a través de la dieta. Si bien la suplementación oral con L-arginina no ha mejorado de manera convincente la biodisponibilidad o la bioactividad del ON, al menos en humanos sanos, la suplementación con nitrato inorgánico en la dieta parece ser mucho más prometedora (Jones et al., 2018; Lundberg et al., 2010). De hecho, el sustrato para la vía nitrato-nitrito-ON incluye no solo el nitrato generado a partir de la oxidación endógena del ON producido a través de la ONS, como se describió anteriormente, sino también el nitrato inorgánico exógeno de la dieta, particularmente el derivado de la ingesta de vegetales de hoja verde como la rúcula (arúgula), la col rizada, la lechuga y la espinaca, así como también algunos tubérculos como la remolacha (betabel) (Hord et al., 2009). Estos vegetales suelen contener más de 250 mg (o ~ 4 mmol) de nitrato por 100 g de peso fresco.

Después de la ingesta, el nitrato de la dieta es absorbido por el tracto gastrointestinal superior hacia el torrente sanguíneo. Aproximadamente el 25% de este nitrato circulante es absorbido luego por la glándula salival y concentrado en la saliva. En la boca, las bacterias residentes reducen parte del nitrato salival a nitrito (Duncan et al., 1995). Después de tragar, una porción de este nitrito se reduce a ON en el ambiente ácido del estómago, pero parte ingresa a la circulación sistémica y se distribuye en la sangre y se almacena en varios tejidos, donde puede sufrir una reducción de un electrón para producir ON. Después de la ingesta aguda de nitrato, las concentraciones plasmáticas máximas de nitrato y nitrito se alcanzan después de aproximadamente 1 h y 2-3 h, respectivamente, con una clara relación dosis-respuesta entre la cantidad de nitrato ingerido y la magnitud del pico posterior (Wylie et al., 2013a). El retraso en el pico de nitrito plasmático, en comparación con el pico de nitrato, destaca la importancia de las bacterias en la boca, el llamado microbioma oral, en la activación del nitrato de la dieta.

EL PAPEL DETERMINANTE DE LA MICROBIOTA ORAL EN LA GENERACIÓN DE ÓXIDO NÍTRICO

La actividad metabólica de la microbiota que habita en el canal alimentario humano puede tener efectos de largo alcance en la fisiología del huésped. Los estudios epidemiológicos han demostrado que una microbiota bucal perturbada y una mala salud bucal se asocian con una variedad de enfermedades, varias de las cuales también se han relacionado con la insuficiencia de ON (Kumar, 2017). El nitrato inorgánico es un micronutriente natural y abunda en una dieta rica en vegetales, pero las células humanas tienen una capacidad limitada para activar el nitrato biológicamente inerte. En cambio, los humanos dependen en gran medida de las bacterias simbióticas que residen en la boca y, en menor medida, en el canal alimentario, para reducir el nitrato ingerido a nitrito bioactivo.

La importancia de la microbiota oral para provocar efectos mediados por el ON a través de la dieta se ilustra en estudios en los que el uso de enjuagues bucales antibacterianos mitigó tanto el aumento de la concentración de nitrito en plasma como la disminución de la presión arterial tras la ingesta de una dosis estandarizada de nitrato (Kapil et al., 2013). Hay diferencias marcadas en la respuesta fisiológica de los sujetos a la suplementación con nitrato y parte de esta variabilidad probablemente se deriva de las diferencias en la capacidad oral de reducción de nitrato. Estudios recientes han comenzado a identificar las principales especies bacterianas reductoras de nitratos en humanos y a investigar la influencia de factores como la dieta, la edad y el estado físico en su prevalencia y actividad. Por ejemplo, se ha demostrado que 7 a 10 días de suplementos dietéticos de nitrato alteran radicalmente la constitución de la microbiota oral, con aumentos proporcionales en *Neisseria* y *Rothia* y disminuciones en *Prevotella* y *Veillonella* (Burleigh et al., 2019; Vanhatalo et al., 2018). En un estudio reciente, un análisis de red de coocurrencia bacteriana a nivel de sistemas identificó dos módulos de microbioma distintos que eran sensibles a la suplementación con nitrato y estaban relacionados con índices de salud cardiovascular (*Rothia-Streptococcus*) y cognitiva (*Neisseria-Haemophilus*) en personas mayores (Vanhatalo et al., 2021). La variabilidad interindividual sustancial y la notable plasticidad de la microbiota oral para las intervenciones dietéticas y de otro tipo sugieren que la modificación prebiótica y/o probiótica del microbioma oral podría tener potencial en el futuro para mejorar la salud humana.

EL MÚSCULO ESQUELÉTICO COMO RESERVORIO DE NITRATOS

Los componentes del ciclo nitrato-nitrito-ON, descrito anteriormente, se han considerado tradicionalmente como "transitorios", es decir, se absorben fácilmente de la dieta y se excretan con una vida media de unas horas. Tal situación, que no implica el almacenamiento a largo plazo de ninguna de las entidades bioquímicas, podría considerarse ineficaz si el ON derivado de nitrato/nitrito es importante para mantener la función fisiológica normal.

Recientemente, los estudios han comenzado a investigar los niveles de nitrato y nitrito en el músculo esquelético. Curiosamente, se ha informado que el nitrato es significativamente más alto en el músculo esquelético de rata en comparación con otros órganos y la sangre, y que la distribución de nitrito muestra una variación menor entre

los tejidos (Piknova et al., 2015). El descubrimiento de niveles significativamente elevados de nitrato en el músculo y la presencia de un gradiente de nitrato entre el músculo y la sangre ha llevado a sugerir que el músculo sirve como un reservorio endógeno de nitrato (Jones et al., 2021). El músculo esquelético tiene la maquinaria necesaria para la generación de nitrato, incluida una alta expresión de ONS neuronal (ONS_n), una de las tres isoformas de ONS. Por lo tanto, es posible que el ON producido por la ONS_n dentro de la célula del músculo esquelético sea oxidado in situ a nitrato por la oximioglobina. Sin embargo, además de la producción endógena de nitrato dentro del músculo esquelético, estudios recientes también indican que el nitrato puede transportarse al músculo desde fuentes dietéticas exógenas. Cuando unas ratas fueron alimentadas con dietas bajas o altas en nitrato, la cantidad de nitrato presente en el tejido muscular disminuyó y aumentó, respectivamente (Gilliard et al., 2018). Este nitrato derivado de la dieta es secuestrado del torrente sanguíneo y es probable que sea transportado a las células musculares por los transportadores de aniones y, tal vez, por difusión.

La sensibilidad del músculo esquelético a la disponibilidad de nitrato a través de la dieta se destaca por los resultados de un estudio en el que ratas fueron primero alimentadas con una dieta baja en nitrato durante siete días para agotar el depósito de nitrato del músculo (inanición de nitrato) antes de cambiar a una dieta alta en nitrato durante siete días (Gilliard et al., 2018). La reintroducción de nitrato en la dieta restauró efectivamente los niveles de nitrato muscular a los niveles de referencia en tres días. Sin embargo, después de siete días de acceso a la dieta alta en nitratos, los niveles musculares de nitrato exce s de nitrato relativamente altos en el músculo esquelético pueden ser importantes para comprender los mecanismos por los cuales el nitrato en la dieta podría mejorar el rendimiento físico, con la existencia de una reserva local de nitrato disponible para apoyar los procesos contráctiles, metabólicos y vasculares relacionados con el ON. De hecho, en lugar de actuar simplemente como un reservorio pasivo para el suministro de nitrato a otros órganos, como el hígado a través del torrente sanguíneo, el tejido muscular parece ser capaz de extraer in situ su reservorio de nitrato. Cuando las ratas se ejercitaron, los niveles de nitrato en el músculo esquelético disminuyeron y los niveles de nitrito aumentaron (Piknova et al., 2016), lo que sugiere que el nitrato almacenado en el músculo esquelético es una fuente importante de ON generado durante el ejercicio. Además, los homogeneizados de músculo esquelético pueden reducir el nitrato a nitrito y el nitrito a ON, siendo este proceso más eficiente a pH bajo en comparación con pH neutro (Srihirun et al., 2020). Un estudio inicial en humanos también demostró un gradiente de nitrato entre la sangre arterial y venosa (Cosby et al., 2003), lo que sugiere que el músculo que se contrae podría utilizar nitrato para apoyar su actividad, con la desoxihemoglobina y la xantina oxidoreductasa actuando potencialmente como nitrato y/o nitrito reductasas.

Es importante enfatizar que la mayoría del trabajo realizado hasta la fecha en esta área se deriva de modelos de ratas y ratones. Sin embargo, los datos preliminares en humanos son prometedores y parecen ser en gran medida consistentes con estos primeros hallazgos (Nyakayiru et al., 2017a; Wylie et al., 2019). Por ejemplo, Wylie y colaboradores (2019) informaron que: (1) las concentraciones iniciales

de nitrato y nitrito fueron apreciablemente más altas en muestras de músculo (de biopsia de m. vastus lateralis) que en plasma, (2) la ingestión de 13 mmol de nitrato en la dieta elevó significativamente los niveles de nitrato muscular, y (3) en la condición suplementada, los niveles de nitrato muscular se redujeron con el ejercicio. Estos resultados refuerzan la idea de que el músculo esquelético es sensible tanto a la oferta como a la demanda de nitrato. Sin embargo, debe reconocerse que estas investigaciones se encuentran en una etapa inicial y se requieren más estudios para confirmar y ampliar estos resultados. La medida en que el rendimiento físico pueda estar relacionado con el contenido de nitrato o nitrito muscular también es un tema importante para futuras investigaciones.

VIEJAS Y NUEVAS APLICACIONES DE LA SUPLEMENTACIÓN DE NITRATOS EN LA DIETA

En un estudio crucial, Larsen y colaboradores (2007) informaron que la suplementación con nitrato de sodio redujo el costo de oxígeno del ciclismo submáximo. Se confirmaron hallazgos similares con jugo de remolacha rico en nitratos (Bailey et al., 2009), donde se informó una reducción de ~3-5% en el consumo de oxígeno a una producción de potencia submáxima fija. Estos resultados implican que el nitrato de la dieta permite que se realice más trabajo muscular por unidad de tiempo con el mismo costo de energía. Es decir, que se mejora la eficiencia de la contracción del músculo esquelético (consulte Pawlak-Chaouch et al., 2016, para un metanálisis). Es bien sabido que la eficiencia o economía del ejercicio es un factor fisiológico importante que influye en el rendimiento en los deportes de resistencia. De acuerdo con esta noción, en varios estudios se ha informado que la suplementación con nitrato de la dieta puede, bajo ciertas circunstancias, mejorar el rendimiento en el ejercicio de resistencia (Cermak et al., 2012; Kelly et al., 2013; Lansley et al., 2011; Rokkedal-Lausch et al., 2019). Sin embargo, en los estudios sobre la suplementación con nitratos y el rendimiento deportivo de resistencia se han mostrado resultados variables, y está claro que la suplementación con nitratos no es beneficiosa en todos los casos (Jones et al., 2018). En particular, los efectos ergogénicos de la suplementación con nitrato se informan con mucha menos frecuencia en atletas altamente entrenados para deportes de resistencia (es decir, $\dot{V}O_{2\text{máx}} > 65$ ml/kg/min) (Porcelli et al., 2015; Senefeld et al., 2020).

En los últimos años, la atención se ha desplazado hacia los beneficios potenciales de la suplementación con nitrato en deportes de alta potencia, sprint y múltiples sprints (Jones et al., 2018). La vía nitrato-nitrito-ON es particularmente favorecida en condiciones de bajo pH y baja disponibilidad de oxígeno y, por lo tanto, la suplementación con nitrato tiene el potencial de ser más efectiva durante el ejercicio continuo e intermitente de alta intensidad cuando la glucólisis anaeróbica hace una contribución significativa al recambio de energía. La tensión de oxígeno relativamente baja que rodea las fibras musculares tipo II (de contracción rápida) puede crear las condiciones óptimas para la reducción de nitrito a ON, y los estudios en animales sugieren que el nitrato puede provocar efectos beneficiosos sobre la función contráctil y el flujo sanguíneo en el músculo tipo II (ver Jones et al., 2016, para revisión). Los atletas bien entrenados que compiten en deportes de alta intensidad, como carreras de velocidad, ciclismo

en pista, patinaje de velocidad y deportes de equipo como baloncesto, fútbol y rugby, probablemente tengan una alta proporción de fibras musculares tipo II, lo que justificaría la eficacia de la suplementación con nitrato en estos deportes.

Varios estudios recientes indican que el nitrato puede mejorar la contractilidad del músculo esquelético, la generación de potencia y el rendimiento en sprints y sprints repetidos (Coggan et al., 2015; Porcelli et al., 2016; Rimer et al., 2016; Wylie et al., 2013b; para revisiones ver Coggan & Peterson, 2018, y Jones et al., 2018.). En particular, existe evidencia convincente de que el rendimiento de sprints repetidos en sujetos moderadamente entrenados puede mejorar con la suplementación con nitrato (Nyakayiru et al., 2017b; Thompson et al., 2016; Wylie et al., 2013b). Además, en un protocolo diseñado para simular las demandas fisiológicas de los deportes de equipo (es decir, 2 tiempos de 40 min que involucran sprints repetidos y pruebas de función cognitiva simultáneas), Thompson y colaboradores (2015) informaron que la suplementación con nitrato aumentó el trabajo total realizado y también produjo un mejor mantenimiento de la velocidad y la precisión de la toma de decisiones en la segunda mitad de la prueba en comparación con la condición de placebo. Estos hallazgos sugieren que la suplementación con nitrato puede ser beneficiosa para el rendimiento en deportes que implican series repetidas de ejercicio de alta intensidad, como fútbol, baloncesto, hockey y rugby.

Wylie y colaboradores (2016) compararon los efectos del nitrato en diferentes tipos de ejercicio intermitente en atletas de deportes de equipo recreativos. Estos autores no informaron ninguna mejora en la potencia durante los sprints repetidos de 30 s, pero encontraron que el rendimiento de los sprints más cortos mejoró después de la suplementación con nitrato. Estos hallazgos son consistentes con la evidencia de que la suplementación con nitrato puede mejorar la producción de fuerza durante la fase inicial de la contracción muscular (Haider & Folland, 2014), mejorar la velocidad y potencia muscular durante las contracciones máximas (Coggan et al., 2015), así como los esfuerzos máximos de sprint (Thompson et al., 2016; Rimer et al., 2017). Jonvik y colegas (2018) informaron que el tiempo para alcanzar la producción de potencia máxima durante sprints repetidos de 30 s fue más corto después de la suplementación con nitrato y que el efecto fue similar en atletas de sprint recreativos, competitivos y de élite. Esto sugiere que en los deportes de alta intensidad donde la aceleración rápida es crucial, la suplementación con nitrato podría ayudar a alcanzar la velocidad máxima más rápido y mejorar el rendimiento deportivo real incluso en el nivel de élite. Es posible que estos efectos estén relacionados con la influencia de la suplementación con nitrato en el manejo y/o la sensibilidad del calcio muscular (Bailey et al., 2019; Coggan & Peterson, 2018; Hernandez et al., 2012). Sin embargo, en humanos Whitfield y colaboradores (2017) encontraron que la suplementación con jugo de remolacha aumentó la producción de fuerza en frecuencias de estimulación bajas, sin alterar la expresión de proteínas musculares asociadas con el manejo del calcio.

APLICACIONES PRÁCTICAS

Según la evidencia disponible y respaldada por un metanálisis reciente (Senefeld et al., 2020), se pueden hacer las siguientes recomendaciones para la suplementación con nitrato para atletas.

- La dosis aguda o diaria de suplementos de nitrato debe ser >370 mg (> 6 mmol), pero no parece haber ningún beneficio adicional al consumir más de 740 mg (12 mmol).
- Los protocolos de suplementación tanto agudos como de varios días (típicamente de 3 a 7 días) pueden ser efectivos.
- La dosis final de nitrato debe ingerirse al menos 90 min antes del evento.
- El consumo de nitrato de forma natural a través de la ingesta de vegetales parece ser más eficaz que las sales de nitrato. Sin embargo, mientras que los efectos ergogénicos y cardiovasculares positivos del nitrato se pueden lograr a través de la ingesta de alimentos, consumir un concentrado de jugo de remolacha probablemente es una estrategia más práctica para los atletas.
- La suplementación con nitrato puede tener un beneficio limitado para los atletas de resistencia de élite, mientras que los atletas de élite que compiten en ejercicios de muy alta intensidad podrían beneficiarse del nitrato.
- El descubrimiento reciente de que el músculo esquelético puede servir como reservorio de nitratos abre la posibilidad de que se produzca una carga suficiente de nitratos en los días previos a una competencia (sin necesidad de recargar poco antes del evento). Sin embargo, debido a que la dosis, la duración, el momento y el tipo de atleta han variado sustancialmente en los estudios publicados, se requiere investigación adicional para determinar la estrategia óptima de suplementación con nitrato para mejorar el rendimiento en deportes específicos.
- Como en muchos otros aspectos de la nutrición deportiva, las mujeres han estado sub-representadas en los estudios sobre nitrato, y las posibles diferencias basadas en el sexo en las respuestas a la suplementación con nitrato requieren investigarse (Wickham & Spriet, 2019).

RESUMEN

El nitrato de la dieta es quizás la ayuda ergogénica nutricional más nueva, y nuestra comprensión del papel del nitrato en las respuestas fisiológicas al ejercicio y en el rendimiento deportivo aún está en desarrollo. Mientras que el nitrato y el nitrito se generan endógenamente de forma continua como productos del metabolismo de ON mediados por la ONS, las reservas de nitrato y nitrito del cuerpo pueden aumentarse de forma exógena a través de la dieta y pueden utilizarse para generar ON en situaciones en las que la función de la ONS está alterada o cuando la disponibilidad de oxígeno en los tejidos es escasa.

Varias observaciones recientes indican que el nitrato puede ser esencial para el músculo esquelético y quizás para una función biológica más amplia. Por ejemplo, (1) durante el ejercicio, las reservas musculares de nitrato disminuyen, y (2) una dieta alta en nitrato aumenta la reserva muscular de nitrato, mientras que una dieta baja en nitrato la reduce. Esta sensibilidad del músculo esquelético a la disponibilidad de nitrato y los cambios dinámicos en nitrato y nitrito durante el ejercicio sugiere un papel importante para el músculo en el mantenimiento de la homeostasis de nitrato y ON en todo el cuerpo. Si el nitrato y/o el nitrito son realmente esenciales para la función muscular normal, entonces la medida en que el rendimiento muscular podría mejorarse aumentando las reservas de nitrato muscular a

través de la suplementación con nitrato en la dieta se convierte en una pregunta importante. Es factible que la suplementación sea beneficiosa cuando las reservas musculares son bajas en relación con la demanda. Sin embargo, puede haber un techo tanto en términos de capacidad de almacenamiento de nitrato muscular como en relación con los resultados funcionales.

Está claro que muchos factores influyen en el potencial de la suplementación con nitrato para mejorar el rendimiento del ejercicio, incluidos la edad, la salud, el sexo, la condición aeróbica y el estado de entrenamiento del individuo, así como la intensidad, la duración y la naturaleza del deporte o la actividad. Sin embargo, también está claro que el consumo de alimentos naturales que contienen nitratos, como las verduras de hoja verde, probablemente sea beneficioso para nuestra salud en general y que, al menos para algunas personas en algunas situaciones, la suplementación con nitratos puede ser una forma conveniente y práctica para mejorar el rendimiento en una variedad de deportes.

Las opiniones expresadas pertenecen a los autores y no reflejan necesariamente la posición o política de PepsiCo, Inc.

REFERENCIAS

- Ahlborg, B.G., J. Bergström, J. Brohult, L.-G. Ekelund, E. Hultman, and G. Maschio (1967). Human muscle glycogen content and capacity for prolonged exercise at different diets. *Försvarsmedicin* 3:85-99.
- Bailey, S.J., P. Winyard, A. Vanhatalo, J.R. Blackwell, F.J. Dimenna, D.P. Wilkerson, J. Tarr, N. Benjamin, and A.M. Jones (2009). Dietary nitrate supplementation reduces the O₂ cost of low-intensity exercise and enhances tolerance to high-intensity exercise in humans. *J. Appl. Physiol.* 107:1144-1155.
- Bailey, S.J., P.G. Gandra, A.M. Jones, M.C. Hogan, and L. Nogueira (2019). Incubation with sodium nitrite attenuates fatigue development in intact single mouse fibres at physiological PO₂. *J. Physiol.* 597:5429-5443.
- Burleigh, M., L. Liddle, D.J. Muggeridge, C. Monaghan, N. Sculthorpe, J. Butcher, F. Henriquez, and C. Easton (2019). Dietary nitrate supplementation alters the oral microbiome but does not improve the vascular responses to an acute nitrate dose. *Nitric Oxide* 89:54-63.
- Cermak, N.M., M.J. Gibala, and L.J. van Loon (2012). Nitrate supplementation's improvement of 10-km time-trial performance in trained cyclists. *Int. J. Sport Nutr. Exerc. Metab.* 22:64-71.
- Coggan, A.R., J.L. Leibowitz, A. Kadkhodayan, D.P. Thomas, S. Ramamurthy, C.A. Spearie, S. Waller, M. Farmer, and L.R. Peterson (2015). Effect of acute dietary nitrate intake on maximal knee extensor speed and power in healthy men and women. *Nitric Oxide* 48:16-21.
- Coggan, A.R., and L.R. Peterson (2018). Dietary nitrate enhances the contractile properties of human skeletal muscle. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 46:254-261.
- Cosby, K., K.S. Partovi, J.H. Crawford, R.P. Patel, C.D. Reiter, S. Martyr, B.K. Yang, M.A. Wacławiw, G. Zalos, X. Xu, K.T. Huang, H. Shields, D.B. Kim-Shapiro, A.N. Schechter, R.O. Cannon 3rd, and M.T. Gladwin (2003). Nitrite reduction to nitric oxide by deoxyhemoglobin vasodilates the human circulation. *Nat. Med.* 9:1498-1505.
- Duncan, C., H. Dougall, P. Johnston, S. Green, R. Brogan, C. Leifert, L. Smith, M. Golden, and N. Benjamin (1995). Chemical generation of nitric oxide in the mouth from the enterosalivary circulation of dietary nitrate. *Nat. Med.* 1:546-551.
- Gilliard, C.N., J.K. Lam, K.S. Cassel, J.W. Park, A.N. Schechter, and B. Piknova (2018). Effect of dietary nitrate levels on nitrate fluxes in rat skeletal muscle and liver. *Nitric Oxide* 75:1-7.
- Haider, G., and J.P. Folland (2014). Nitrate supplementation enhances the contractile properties of human skeletal muscle. *Med. Sci. Sports Exerc.* 46:2234-2243.
- Hernández, A., T.A. Schiffer, N. Ivarsson, A.J. Cheng, J.D. Bruton, J.O. Lundberg, E. Weitzberg, and H. Westerblad (2012). Dietary nitrate increases tetanic [Ca²⁺]_i and contractile force in mouse fast-twitch muscle. *J. Physiol.* 590:3575-3583.
- Hord, N.G., Y. Tang, and N.S. Bryan (2009). Food sources of nitrates and nitrites: the physiologic context for potential health benefits. *Am. J. Clin. Nutr.* 90:1-10.
- Jones, A.M., S.K. Ferguson, S.J. Bailey, A. Vanhatalo, and D.C. Poole (2016). Fiber type-specific effects of dietary nitrate. *Exerc. Sport Sci. Rev.* 44:53-60.
- Jones, A.M., C. Thompson, L.J. Wylie, and A. Vanhatalo (2018). Dietary nitrate and physical performance. *Annu. Rev. Nutr.* 38:303-328.
- Jones, A.M., A. Vanhatalo, D.R. Seals, M.J. Rossman, B. Piknova, and K.L. Jonvik (2021). Dietary nitrate and nitric oxide metabolism: mouth, circulation, skeletal muscle, and exercise performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 53:280-294.
- Jonvik, K.L., J. Nyakayiru, J.W. Van Dijk, K. Maase, S.B. Ballak, J.M.G. Senden, L.J.C. Van Loon, and L.B. Verdijk (2018). Repeated-sprint performance and plasma responses following beetroot juice supplementation do not differ between recreational, competitive, and elite sprint athletes. *Eur. J. Sport Sci.* 18:524-533.
- Kapil, V., S.M. Haydar, V. Pearl, J.O. Lundberg, E. Weitzberg, and A. Ahluwalia (2013). Physiological role for nitrate-reducing oral bacteria in blood pressure control. *Free Radic. Biol. Med.* 55:93-100.
- Kelly, J., A. Vanhatalo, D.P. Wilkerson, L.J. Wylie, and A.M. Jones (2013). Effects of nitrate on the power-duration relationship for severe-intensity exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 45:1798-1806.
- Kumar, P.S. (2017). From focal sepsis to periodontal medicine: a century of exploring the role of the oral microbiome in systemic disease. *J. Physiol.* 595:465-476.
- Lansley, K.E., P.G. Winyard, S.J. Bailey, A. Vanhatalo, D.P. Wilkerson, J.R. Blackwell, M. Gilchrist, N. Benjamin, and A.M. Jones (2011). Acute dietary nitrate supplementation improves cycling time trial performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 43:1125-1131.
- Larsen, F.J., E. Weitzberg, J.O. Lundberg, and B. Ekblom (2007). Effects of dietary nitrate on oxygen cost during exercise. *Acta Physiol.* 191:59-66.
- Lundberg, J.O., M. Carlstrom, F.J. Larsen, and E. Weitzberg (2010). Roles of dietary inorganic nitrate in cardiovascular health and disease. *Cardiovasc. Res.* 89:525-532.
- Maughan, R.J., P.L. Greenhaff, and P. Hespel (2011). Dietary supplements for athletes: emerging trends and recurring themes. *J. Sports Sci.* 29 Suppl 1:S57-S66.
- McMahon, N.F., M.D. Leveritt, and T.G. Pavey (2017). The effect of dietary nitrate supplementation on endurance exercise performance in healthy adults: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med.* 47:735-756.
- Nyakayiru, J., I.W.K. Kouw, N.M. Cermak, J.M. Senden, L.J.C. van Loon, and L.B. Verdijk (2017a). Sodium nitrate ingestion increases skeletal muscle nitrate content in humans. *J. Appl. Physiol.* 123:637-644.
- Nyakayiru, J., K.L. Jonvik, J. Trommelen, P.J. Pinckaers, J.M. Senden, L.J. van Loon, and L.B. Verdijk (2017b). Beetroot juice supplementation improves high-intensity intermittent type exercise performance in trained soccer players. *Nutrients* 9:314.
- Pawlak-Chaouch, M., J. Boissière, F.X. Gamelin, G. Cuvelier, S. Berthoin, and J. Aucouturier (2016). Effect of dietary nitrate supplementation on metabolic rate during rest and exercise in human: A systematic review and a meta-analysis. *Nitric Oxide* 53:65-76.
- Piknova, B., J.W. Park, K.M. Swanson, S. Dey, C.T. Noguchi, and A.N. Schechter (2015). Skeletal muscle as an endogenous nitrate reservoir. *Nitric Oxide* 47:10-16.
- Piknova, B., J.W. Park, K.K.J. Lam, and A.N. Schechter (2016). Nitrate as a source of nitrite and nitric oxide during exercise hyperemia in rat skeletal muscle. *Nitric Oxide* 55-56:54-61.
- Porcelli, S., M. Ramaglia, G. Bellistri, G. Pavei, L. Pugliese, M. Montorsi, L. Rasica L., and M. Marzorati (2015). Aerobic fitness affects the exercise performance responses to nitrate supplementation. *Med. Sci. Sports Exerc.* 47:1643-1651.
- Porcelli, S., L. Pugliese, E. Rejc, G. Pavei, M. Bonato, M. Montorsi, A. La Torre, L. Rasica L., and M. Marzorati (2016). Effects of a short-term high-nitrate diet on exercise performance. *Nutrients* 8:534.
- Rimer, E.G., L.R. Peterson, A.R. Coggan, and J.C. Martin (2016). Increase in maximal cycling power with acute dietary nitrate supplementation. *Int. J. Sports Physiol. Perform.* 11:715-720.
- Rokkedal-Lausch, T., J. Franch, M.K. Poulsen, L.P. Thomsen, E. Weitzberg, E.N. Kamavuako, D.S. Karbing, and R.G. Larsen (2019). Chronic high-dose beetroot juice supplementation improves time trial performance of well-trained cyclists in normoxia and hypoxia. *Nitric Oxide* 85:44-52.

- Senefeld, J.W., C.C. Wiggins, R.J. Regimbal, P.B. Dominelli, S.E. Baker, and M.J. Joyner (2020). Ergogenic effect of nitrate supplementation: a systematic review and meta-analysis. *Med. Sci. Sports Exerc.* 52:2250-2261.
- Srihirun, S., J.W. Park, R. Teng, W. Sawaengdee, B. Piknova, and A.N. Schechter (2020). Nitrate uptake and metabolism in human skeletal muscle cell cultures. *Nitric Oxide* 94:1-8.
- Thompson, C., L.J. Wylie, J. Fulford, J. Kelly, M.I. Black, S.T. McDonagh, A.E. Jeukendrup, A. Vanhatalo, and A.M. Jones (2015). Dietary nitrate improves sprint performance and cognitive function during prolonged intermittent exercise. *Eur. J. Appl. Physiol.* 115:1825-1834.
- Thompson, C., A. Vanhatalo, H. Jell, J. Fulford, J. Carter, L. Nyman, S.J. Bailey, and A.M. Jones (2016). Dietary nitrate supplementation improves sprint and high-intensity intermittent running performance. *Nitric Oxide* 61:55-61.
- Vanhatalo, A., J.R. Blackwell, J.E. L'Heureux, D.W. Williams, A. Smith, M. van der Giezen, P.G. Winyard, J. Kelly, and A.M. Jones (2018). Nitrate-responsive oral microbiome modulates nitric oxide homeostasis and blood pressure in humans. *Free Radic. Biol. Med.* 124:21-30.
- Vanhatalo, A., J.E. L'Heureux, J. Kelly, J.R. Blackwell, L.J. Wylie, J. Fulford, P.G. Winyard, D.W. Williams, M. van der Giezen, and A.M. Jones (2021). Network analysis of nitrate-sensitive oral microbiome reveals interactions with cognitive function and cardiovascular health across dietary interventions. *Redox Biol.* 41:101933.
- Whitfield, J., D. Gamu, G.J.F. Heigenhauser, L.J.C. Van Loon, L.L. Spriet, A.R. Tupling, and G.P. Holloway (2017). Beetroot juice increases human muscle force without changing Ca²⁺-handling proteins. *Med. Sci. Sports Exerc.* 49:2016-2024.
- Wickham, K.A., and L.L. Spriet (2019). No longer beeting around the bush: a review of potential sex differences with dietary nitrate supplementation. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.* 44:915-924.
- Wylie, L.J., J. Kelly, S.J. Bailey, J.R. Blackwell, P.F. Skiba, P.G. Winyard, A.E. Jeukendrup, A. Vanhatalo, and A.M. Jones (2013a). Beetroot juice and exercise: pharmacodynamic and dose-response relationships. *J. Appl. Physiol.* 115:325-336.
- Wylie, L.J., M. Mohr, P. Krstrup, S.R. Jackman, G. Ermidis, J. Kelly, M.I. Black, S.J. Bailey, A. Vanhatalo, and A.M. Jones (2013b). Dietary nitrate supplementation improves team sport-specific intense intermittent exercise performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 113:1673-1684.
- Wylie, L.J., S.J. Bailey, J. Kelly, J.R. Blackwell, A. Vanhatalo, and A.M. Jones (2016). Influence of beetroot juice supplementation on intermittent exercise performance. *Eur. J. Appl. Physiol.* 116:415-25.
- Wylie, L.J., J.W. Park, A. Vanhatalo, S. Kadach, M.I. Black, Z. Stoyanov, A.N. Schechter, A.M. Jones, and B. Piknova (2019). Human skeletal muscle nitrate store: influence of dietary nitrate supplementation and exercise. *J. Physiol.* 597:5565-5576.

TRADUCCIÓN

Este artículo ha sido traducido y adaptado de: DIETARY NITRATE AND EXERCISE PERFORMANCE: NEW STRINGS TO THE BEETROOT BOW. Sports Science Exchange, Vol. 35, No. 222, 1-5, por el M.Sc. Pedro Reinaldo García.