

MECANISMOS DE RECUPERACIÓN

METABÓLICA

La recuperación no es un simple “apagado” del metabolismo tras el ejercicio: es un proceso activo, que consume energía y que sigue una secuencia bioquímica ordenada para restaurar el equilibrio celular alterado por el esfuerzo. Comprender esta secuencia permite diseñar tiempos de descanso, sesiones de entrenamiento y estrategias nutricionales ajustadas a las necesidades reales de cada sistema energético (McArdle et al., 2022).

Dato clave

Después de un ejercicio intenso, el consumo de oxígeno no vuelve a su nivel de reposo de forma inmediata, sino que permanece elevado durante minutos u horas. Este fenómeno, conocido como EPOC (*Excess Post-exercise Oxygen Consumption*), refleja el costo energético de restaurar el equilibrio metabólico alterado por el ejercicio (Powers & Howley, 2017).

Restauración de los sistemas energéticos

Cada sistema energético se recupera a una velocidad distinta, lo que tiene implicaciones directas para el diseño de los intervalos de descanso en el entrenamiento (McArdle et al., 2022):

- **Fosfocreatina:** Se resintetiza con gran rapidez; aproximadamente el 50% se restaura en 30 segundos y el 80-90% en 3-5 minutos de recuperación, gracias a la reacción inversa de la creatina quinasa alimentada por la resíntesis aeróbica de ATP.
- **Remoción de lactato:** La recuperación activa (ejercicio ligero) acelera la remoción de lactato en comparación con la recuperación pasiva, al mantener el flujo sanguíneo muscular elevado y favorecer su oxidación como combustible por otras fibras y órganos (lanzadera de lactato, estudiada en la Unidad 2).

- **Resíntesis de glucógeno:** Es el proceso más lento; puede tardar entre 24 y 48 horas en completarse, y su velocidad depende directamente de la cantidad y el momento de la ingesta de carbohidratos, siendo más rápida en las primeras horas posteriores al ejercicio.
- **Restauración del pH muscular:** Los sistemas amortiguadores (bicarbonato, fosfato, proteínas musculares como la carnosina) neutralizan progresivamente el exceso de H^+ acumulado, un proceso que se completa en la primera hora de recuperación en la mayoría de los casos.

EPOC: el costo energético de la recuperación

El EPOC tiene dos componentes bien diferenciados (Powers & Howley, 2017):

- **Componente rápido (primeros minutos):** refleja la resíntesis de ATP y fosfocreatina, la reoxigenación de la mioglobina y el aumento del gasto energético asociado a la frecuencia cardíaca y respiratoria elevadas.
- **Componente lento (puede prolongarse varias horas):** refleja procesos de mayor duración como la eliminación de lactato residual, la elevación de la temperatura corporal, el incremento de las catecolaminas circulantes y la reparación del daño tisular inducido por el ejercicio.

La magnitud del EPOC aumenta con la intensidad del ejercicio, lo que explica por qué el entrenamiento interválico de alta intensidad (HIIT) genera un gasto energético post-ejercicio notablemente mayor que el ejercicio continuo de baja intensidad, incluso cuando el gasto calórico durante la sesión es similar.

Reparación tisular y síntesis proteica

El ejercicio, especialmente el entrenamiento de fuerza y los esfuerzos excéntricos, produce microlesiones en las fibras musculares. La recuperación de este daño estructural involucra una respuesta inflamatoria controlada y la activación de células satélite que contribuyen a la reparación y al crecimiento del tejido muscular (Gropper & Smith, 2021).

Como se explicó en la Unidad 1, existe una **ventana de sensibilidad anabólica** en las primeras horas posteriores al ejercicio, durante la cual la síntesis proteica muscular (MPS) está especialmente activada. El consumo de proteína de alta calidad en este periodo, junto

con carbohidratos que favorecen la liberación de insulina, optimiza tanto la resíntesis de glucógeno como la reparación y el crecimiento del tejido muscular.

Modalidades de recuperación: análisis crítico de la evidencia

En las últimas décadas se han popularizado numerosas modalidades de recuperación que prometen acelerar los procesos bioquímicos descritos en esta sección. Su respaldo científico, sin embargo, es heterogéneo (Chamorro, 2018; McArdle et al., 2022):

- **Crioterapia (inmersión en agua fría, cámaras de frío):** reduce la percepción de dolor muscular y la inflamación local mediante vasoconstricción, aunque evidencia reciente sugiere que su uso sistemático tras el entrenamiento de fuerza podría atenuar algunas señales anabólicas asociadas a la inflamación controlada, por lo que su uso debe planificarse con cuidado según el objetivo de la sesión.
- **Prendas de compresión:** pueden mejorar la percepción subjetiva de recuperación y, en menor medida, favorecer el retorno venoso, aunque su efecto sobre marcadores bioquímicos objetivos (CK, lactato) es modesto y variable entre estudios.
- **Estiramiento y masaje:** el masaje puede reducir la percepción de dolor muscular y mejorar el flujo sanguíneo local; su efecto directo sobre la velocidad de resíntesis de glucógeno o la eliminación de metabolitos es, sin embargo, limitado según la evidencia disponible.
- **Recuperación activa:** como se explicó anteriormente, es una de las estrategias con mayor respaldo bioquímico directo, al acelerar de forma demostrada la remoción de lactato.

El denominador común de estas modalidades es que ninguna sustituye a los tres pilares bioquímicos fundamentales de la recuperación: la disponibilidad adecuada de sustratos (carbohidratos y proteína), el tiempo suficiente para que los procesos enzimáticos de resíntesis se completen, y el sueño de calidad, que se abordará en profundidad en el siguiente tema.

Aplicación deportiva — Recuperación activa vs. pasiva

La recuperación activa (ejercicio ligero, 30-60% del VO_2max) tras un esfuerzo intenso acelera la remoción de lactato en comparación con el reposo absoluto, gracias al mantenimiento del flujo sanguíneo muscular. Sin embargo, la recuperación pasiva puede ser preferible cuando el objetivo prioritario es la resíntesis de glucógeno o la reparación tisular tras un daño muscular significativo (McArdle et al., 2022).

Tabla. Tiempos aproximados de recuperación de los distintos sistemas fisiológicos

Proceso de recuperación	Tiempo aproximado	Factor limitante principal
Restauración de ATP y fosfocreatina	Segundos a 5 minutos	Disponibilidad de oxígeno y creatina quinasa
Remoción de lactato	30-60 minutos (más rápido con recuperación activa)	Flujo sanguíneo y capacidad oxidativa
Normalización del pH muscular	Minutos a 1 hora	Capacidad amortiguadora muscular
Resíntesis de glucógeno muscular	24-48 horas	Ingesta y momento de consumo de carbohidratos
Reparación del daño muscular	48-72 horas o más	Síntesis proteica, sueño e inflamación controlada

Nota. *Tiempos aproximados de recuperación de los distintos sistemas fisiológicos. Adaptado de McArdle et al. (2022) y Powers y Howley (2017).*

Ejemplo Integrador: recuperación tras una sesión de HIIT

Tras una sesión de entrenamiento interválico de alta intensidad, el organismo activa de forma simultánea varios procesos de recuperación: en los primeros minutos se restauran el ATP y la fosfocreatina y comienza la remoción del lactato acumulado; en la primera hora se normaliza el pH muscular; en las horas siguientes, con una ingesta adecuada de

carbohidratos y proteína, se inicia la resíntesis de glucógeno y la síntesis proteica muscular; y durante el sueño de esa noche se libera hormona del crecimiento, que potencia tanto la reparación tisular como la consolidación de las adaptaciones inducidas por el entrenamiento (McArdle et al., 2022).

Si esta misma sesión se repite al día siguiente sin haber completado la resíntesis de glucógeno ni la reparación del daño muscular, el rendimiento de la segunda sesión se verá comprometido, y la acumulación de este déficit a lo largo de varios días es, precisamente, uno de los mecanismos bioquímicos que subyacen al sobreentrenamiento estudiado en el tema anterior. Esta es la razón por la que la planificación de los microciclos de entrenamiento debe respetar los tiempos de recuperación descritos en la Tabla 3, y no únicamente el calendario de competencias.

Síntesis conceptual

La recuperación es un proceso activo, jerárquico y multitemporal: mientras el ATP y la fosfocreatina se restauran en minutos, el glucógeno y el tejido muscular dañado pueden requerir días. Diseñar un programa de entrenamiento eficaz exige respetar estos tiempos diferenciados, en lugar de asumir que todos los sistemas se recuperan al mismo ritmo.