

RADICALES LIBRES Y ESTRÉS OXIDATIVO

El oxígeno, indispensable para la producción aeróbica de ATP, tiene también un costado menos conocido: una pequeña fracción del oxígeno que atraviesa la cadena transportadora de electrones se convierte en especies químicamente inestables conocidas como especies reactivas de oxígeno (ERO). El ejercicio, al multiplicar el consumo de oxígeno, multiplica también la producción de estas moléculas, generando un fenómeno conocido como estrés oxidativo inducido por el ejercicio (Gropper & Smith, 2021).



Dato clave

Entre el 1 y el 5% del oxígeno consumido por la mitocondria en reposo escapa de la cadena transportadora de electrones como especies reactivas de oxígeno. Durante el ejercicio intenso, el consumo total de oxígeno puede multiplicarse hasta veinte veces, lo que incrementa de forma proporcional la producción de estas moléculas (Powers & Howley, 2017).

Especies reactivas de oxígeno (ERO): origen y tipos

Un radical libre es cualquier especie química con uno o más electrones desapareados en su último orbital, lo que lo hace extremadamente reactivo. Las principales ERO generadas durante el ejercicio son (Murray et al., 2021):

- **Anión superóxido ($O_2^{\bullet-}$):** generado principalmente por la fuga de electrones en los complejos I y III de la cadena transportadora de electrones mitocondrial.

- **Peróxido de hidrógeno (H_2O_2):** formado a partir del superóxido por acción de la enzima superóxido dismutasa; no es un radical libre en sentido estricto, pero es igualmente reactivo.
- **Radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$):** el más reactivo y dañino de todos, formado a partir del peróxido de hidrógeno en presencia de metales de transición como el Fe^{2+} (reacción de Fenton).

Además de la mitocondria, otras fuentes de ERO durante el ejercicio incluyen la enzima xantina oxidasa (activada durante la isquemia-reperfusión muscular) y las células inmunitarias reclutadas durante la respuesta inflamatoria posterior al daño muscular inducido por el ejercicio (Gropper & Smith, 2021).

Sistema antioxidante endógeno

El organismo cuenta con un sofisticado sistema de defensa antioxidante, capaz de neutralizar las ERO antes de que dañen las biomoléculas celulares (Lieberman & Marks, 2019):

- **Antioxidantes enzimáticos:** la superóxido dismutasa (SOD) convierte el superóxido en peróxido de hidrógeno; la catalasa y la glutatión peroxidasa convierten el peróxido de hidrógeno en agua. Todas requieren cofactores minerales estudiados en la Unidad 1 (Cu, Zn, Mn, Se).
- **Antioxidantes no enzimáticos:** el glutatión reducido, la vitamina C (ácido ascórbico), la vitamina E (alfa-tocoferol) y los carotenoides actúan como “trampas” que ceden electrones a los radicales libres, neutralizándolos.

Cuando la producción de ERO supera la capacidad del sistema antioxidante para neutralizarlas, se produce el **estrés oxidativo**, que puede dañar lípidos de membrana (peroxidación lipídica), proteínas y ADN, comprometiendo la función celular (Murray et al., 2021).

Estrés oxidativo inducido por el ejercicio: la paradoja del ejercicio

Durante mucho tiempo se consideró a las ERO exclusivamente como agentes dañinos. Hoy se sabe que, en las dosis moderadas generadas por el ejercicio regular, actúan también como **moléculas señalizadoras** que activan factores de transcripción como el Nrf2, estimulando la síntesis de más enzimas antioxidantes y promoviendo la biogénesis

mitocondrial vía PGC-1 α —un fenómeno conocido como **hormesis**: una dosis moderada de estrés produce una respuesta adaptativa beneficiosa (Gropper & Smith, 2021).

El equilibrio se rompe cuando el volumen o la intensidad del entrenamiento superan la capacidad de recuperación del organismo, situación asociada al **sobreentrenamiento**, en la que el estrés oxidativo crónico contribuye a la fatiga persistente, la inmunosupresión y el deterioro del rendimiento.

Este concepto de hormesis explica también por qué las intervenciones dirigidas a “eliminar por completo” el estrés oxidativo del ejercicio —como la suplementación masiva con antioxidantes— pueden resultar contraproducentes: el objetivo fisiológicamente razonable no es anular las ERO, sino mantener su producción dentro de un rango que estimule la adaptación sin desbordar la capacidad antioxidante del organismo (Ristow et al., 2009).

Biomarcadores del estrés oxidativo

La investigación y el control del entrenamiento de alto rendimiento utilizan diversos biomarcadores para cuantificar el nivel de estrés oxidativo de un deportista (Gropper & Smith, 2021; Lieberman & Marks, 2019):

- **Malondialdehído (MDA)**: producto de la peroxidación lipídica de las membranas celulares; uno de los marcadores de daño oxidativo más utilizados en la investigación deportiva.
- **8-hidroxi-2'-desoxiguanosina (8-OHdG)**: marcador de daño oxidativo al ADN, indicativo de estrés oxidativo crónico o excesivo.
- **Capacidad antioxidante total (TAC)**: mide la capacidad global del plasma para neutralizar radicales libres, integrando el efecto conjunto de los antioxidantes enzimáticos y no enzimáticos.
- **Glutación reducido/oxidado (GSH/GSSG)**: la relación entre estas dos formas del glutatión es un indicador sensible del estado redox celular; una disminución de esta relación indica mayor estrés oxidativo.

Estos biomarcadores permiten a los equipos de ciencias del deporte ajustar las cargas de entrenamiento antes de que el estrés oxidativo acumulado se traduzca en fatiga crónica o lesiones, complementando la información obtenida de los marcadores de daño muscular vistos en el tema anterior.

Aplicación deportiva — El debate sobre la suplementación antioxidante

Estudios recientes muestran que la suplementación con dosis altas de antioxidantes (vitamina C y E) durante periodos de entrenamiento intenso puede, paradójicamente, **atenuar** algunas adaptaciones al ejercicio (como la biogénesis mitocondrial), precisamente porque bloquea la señalización que las ERO moderadas activan. Esto ha llevado a recomendar cautela con la suplementación antioxidante en dosis altas durante las fases de entrenamiento intenso (Jeukendrup & Gleeson, 2018).

Tabla. Principales componentes del sistema antioxidante endógeno

Componente	Tipo	Función
Superóxido dismutasa (SOD)	Enzimático	Convierte $O_2^{\bullet-}$ en H_2O_2
Catalasa	Enzimático	Convierte H_2O_2 en agua y oxígeno
Glutación peroxidasa	Enzimático (requiere selenio)	Convierte H_2O_2 en agua
Vitamina C	No enzimático	Cede electrones para neutralizar radicales libres
Vitamina E	No enzimático	Protege los lípidos de membrana de la peroxidación

Nota. Principales componentes del sistema antioxidante endógeno. Adaptado de Lieberman y Marks (2019) y Murray et al. (2021).

Ejemplo Integrador: Hormesis frente a sobreentrenamiento

Dos deportistas pueden experimentar niveles de estrés oxidativo muy distintos según cómo esté estructurado su entrenamiento. Uno, con cargas progresivas y suficiente recuperación, genera ERO moderadas que activan la



síntesis de más enzimas antioxidantes y más mitocondrias, mejorando su capacidad oxidativa con el tiempo; sus biomarcadores de estrés oxidativo (MDA, 8-OHdG) se mantienen dentro de rangos normales y su relación GSH/GSSG permanece estable. El otro, sometido a un volumen excesivo sin descanso adecuado, acumula estrés oxidativo crónico que supera la capacidad de su sistema antioxidante: sus biomarcadores se elevan de forma sostenida, contribuyendo a fatiga persistente, mayor susceptibilidad a infecciones y estancamiento del rendimiento —el cuadro característico del síndrome de sobreentrenamiento (Gropper & Smith, 2021).

Este ejemplo refuerza una idea central de todo el tema: el ejercicio en sí mismo no es “bueno” ni “malo” desde el punto de vista del estrés oxidativo; lo determinante es la relación entre la carga aplicada y la capacidad de recuperación y adaptación del organismo en cada momento.

Síntesis conceptual

Las especies reactivas de oxígeno son, al mismo tiempo, un subproducto potencialmente dañino del metabolismo aeróbico y una señal necesaria para la adaptación al entrenamiento. El reto para el profesional del deporte no es eliminar el estrés oxidativo, sino dosificar la carga de entrenamiento de manera que las ERO generadas estimulen la adaptación sin sobrepasar la capacidad del sistema antioxidante del deportista.