

# Trabajo Fin de Grado

Grado en Biotecnología



## **Efectos de las algas y sus compuestos bioactivos sobre el rendimiento físico y la recuperación post-ejercicio: una revisión narrativa con énfasis en *Ulva* spp.**

Alumno: Xavier Sáez López

Tutor: Néstor Vicente Salar

Cotutor: José Manuel Sarabia Marín

Área: Biotecnología alimentaria

Titulación: Grado en Biotecnología

Facultad de Ciencias Experimentales

# Índice general

## 1. Introducción

- 1.1. Contextualización
- 1.2. Clasificación de las algas
  - 1.2.1. Microalgas
  - 1.2.2. Macroalgas
- 1.3. Composición nutricional general
- 1.4. Características y composición nutricional de *Ulva* spp.
- 1.5. Rendimiento y recuperación deportiva

## 2. Objetivos

- Objetivo General
- Objetivos Específicos

## 3. Metodología

- 3.1. Estrategia de búsqueda
  - 3.1.1. Términos de búsqueda
  - 3.1.2. Criterios de selección

## 4. Desarrollo

- 4.1. Comparativa estudios clínicos
- 4.2. Composición química de *Ulva* spp. y su relevancia deportiva
  - 4.2.1. La pared celular: el ulvano
  - 4.2.2. Perfil nutricional y compuestos bioactivos
  - 4.2.3. Impacto en el metabolismo del deportista
  - 4.2.4. Mitigación del estrés oxidativo y activación de las vías NRF2
  - 4.2.5. Regulación inflamatoria, inmunológica y hormonal
  - 4.2.6. Implicación práctica en el rendimiento
- 4.3. Comparativa de especies
  - 4.3.1. Diferencias biológicas y bioquímicas
  - 4.3.2. Diferencias en el rendimiento deportivo
  - 4.3.3. Recuperación y resiliencia fisiológica
- 4.4. Las algas en el rendimiento aeróbico y en la potencia/fuerza

- 4.4.1. Rendimiento Aeróbico
- 4.4.2. Rendimiento a nivel de fuerza y potencia
- 4.4.3. Vía NRF2 y retraso de la fatiga
- 4.5. Recuperación post-ejercicio y estrés oxidativo
  - 4.5.1. Disminución de marcadores de daño muscular
  - 4.5.2. Activación de la vía antioxidante endógena (NRF2)
  - 4.5.3. Respuesta del sistema autónomo y fatiga mental
  - 4.5.4. Modulación del sistema inmune y restauración de mucosas

## 5. Conclusiones

## 6. Limitaciones del estudio y líneas futuras de investigación

- 6.1. Limitaciones del estudio
- 6.2. Líneas futuras de investigación

## 7. Bibliografía



## Índice de Tablas

- **Tabla 1.** Términos utilizados en la búsqueda de rendimiento deportivo en las algas.
- **Tabla 2.** Términos utilizados en la búsqueda de recuperación en las algas.
- **Tabla 3.** Resumen de estudios clínicos incluidos en la revisión.
- **Tabla 4.** Información nutricional de *Ulva* spp.
- **Tabla 5.** Impacto de la suplementación con algas en marcadores metabólicos.
- **Tabla 6.** Diferencias biológicas y bioquímicas de especies diferentes.
- **Tabla 7.** Comparativa de mecanismos antioxidantes y de recuperación por especie.



## Resumen

Las algas marinas han estado vinculadas a la alimentación y la medicina tradicional desde la antigüedad, y actualmente su alto contenido en proteínas de alta calidad, polisacáridos sulfatados, carotenoides y polifenoles las posiciona como opciones interesantes para la nutrición deportiva. Su capacidad antioxidante, antiinflamatoria e inmunomoduladora caracteriza a las algas como posibles ayudas ergogénicas para deportistas, a pesar de que la evidencia científica al respecto sigue siendo emergente.

Para la realización de esta revisión narrativa se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica en la base de datos PubMed mediante términos Mesh combinados, seleccionando finalmente 18 estudios clínicos en humanos publicados en los últimos diez años que cumplieran los criterios de inclusión establecidos.

Los resultados muestran que distintas especies actúan a través de mecanismos fisiológicos diferenciados. *Tetraselmis chuii* y *Chlorella vulgaris* mejoran el consumo máximo de oxígeno y la función cardiovascular; la astaxantina potencia la potencia explosiva y protege la integridad mitocondrial; y la espirulina reduce marcadores de daño muscular como la creatina quinasa. *Ulva* spp. destaca por mejorar el perfil metabólico del deportista, con reducciones significativas de hemoglobina glicosilada, triglicéridos y colesterol LDL, así como por la activación de la vía NRF2, que regula la respuesta antioxidante endógena. Otros compuestos como el fucoidano y el paramilón de *Euglena gracilis* muestran un papel relevante en la restauración de la inmunidad mucosa, frecuentemente comprometida tras el ejercicio de alta intensidad.

En conclusión, las algas presentan un perfil bioactivo con potencial ergogénico real, actuando principalmente como moduladores transcripcionales y metabólicos. Sin embargo, la heterogeneidad metodológica y el reducido tamaño de las muestras de los estudios disponibles limitan la generalización de los resultados, por lo que se requieren ensayos clínicos más amplios y controlados para establecer recomendaciones dietéticas concretas en el ámbito deportivo.

# 1.Introducción

## 1.1. Contextualización

Las algas han estado relacionadas con la vida diaria de los humanos desde la prehistoria, de forma que eran recolectadas por las poblaciones costeras para usos nutricionales y medicinales debido a la cantidad de propiedades que tenían. Desde hace miles de años, han sido parte fundamental de las dietas de países orientales como China, Japón y Corea, además de otras culturas de Latinoamérica (1).

En América, las primeras poblaciones en utilizar las algas fueron los aztecas, consumiendo *Arthrospira* (espirulina) para mejorar su rendimiento y resistencia física (2). Por otro lado, a nivel científico comenzó a tener importancia tras el descubrimiento del sabor umami a partir del alga kombu (*kombu dashi*) en 1907 por el Dr. Kikunae, el cual demostró la gran aportación química que tenían estos organismos naturales (2).

Mientras tanto, en Oriente se integró en el uso diario el consumo de especies como Nori, Kombu y Wakame como verduras procedentes del mar. Sin embargo, en Occidente las algas adquirieron inicialmente una función más técnica, de forma que se utilizaban como agentes espesantes de las industrias farmacéuticas y alimentarias mediante la extracción de hidrocoloides como el agar, la carragenina y el alginato (1). Con el paso del tiempo, han sido introducidos en ciertos alimentos de Europa como los fideos de algas patentados en 1993 o el pan de algas (algenbrot) creado en Austria y Alemania.

El 15 de mayo de 1997, se produjo la entrada en vigor del nuevo Reglamento sobre Nuevos Alimentos de la Unión Europea, provocando que todas las especies que no tuvieran un historial de consumo significativo debían pasar unas evaluaciones de seguridad, de forma que el mercado de suplementos alimentarios había adquirido un carácter más profesional (2). Además, durante los mismos años se produjo un incremento significativo en la producción a nivel mundial, triplicándose entre el año 2000 y 2018, llegando a producirse 32,4 millones de toneladas de este organismo (3).

En el mundo, cada vez se prioriza más la búsqueda de fuentes alimentarias sostenibles, y es por ello, que la necesidad de fuentes de proteína sostenibles está provocando el paso de las algas al mundo deportivo. Los atletas, quienes requieren una cantidad entre 1,4 y 2,0 g/kg/día de proteína comienzan a encontrar estas aportaciones que necesitan en las microalgas (4). Algunas especies como la espirulina y las *Chlorella* ofrecen hasta un 70% de proteína en peso seco y su contenido en aminoácidos de cadena ramificada (BCAAs en sus siglas en inglés) es similar al de alimentos como la soja o el huevo (1) (2). Sin embargo, las algas pueden

ofrecer diferentes características que tienen una gran significancia en el ámbito deportivo, como su capacidad antioxidante, antiinflamatoria, inmunitaria y metabólica.

Aunque diversos estudios han aportado resultados prometedores sobre el potencial de las algas como ayuda ergogénica, la evidencia científica actual se considera todavía emergente. Por ejemplo, en trabajos realizados en un grupo de ciclistas se ha demostrado como aumenta la potencia de salida en esprints y reduce la frecuencia cardíaca y el lactato en sangre tras recibir una suplementación basada en espirulina (4).

Algunos de los alimentos funcionales que se han desarrollado mediante las algas en los últimos años son: la leche de microalgas en 2021, sodas funcionales que capturan CO<sub>2</sub> en 2022, y el desarrollo de carne cultivada híbrida (75% cerdo, 25% microalgas) en 2023 (2). En definitiva, las algas han pasado de ser un alimento utilizado durante muchos años como subsistencia a ser un alimento biotecnológico que puede ser muy útil para el rendimiento y la recuperación deportiva, además de la salud.

## 1.2. Clasificación de las algas

Las algas se consideran organismos acuáticos, autótrofos fotosintéticos que liberan oxígeno. Pueden ser unicelulares, coloniales o compuestos por tejidos simples. Actualmente, se clasifican en cuatro reinos diferentes: Bacteriae, Plantae, Chromista y Protozoa. Además, se dividen principalmente en dos grandes grupos según su tamaño y estructura: las macroalgas y las microalgas.

Se estima que podrían existir 1 millón de especies, aunque según los datos almacenados en AlgaeBase, aproximadamente hay 60.000 especies documentadas (5).

### 1.2.1. Microalgas

Las microalgas son organismos unicelulares y microscópicos que abarcan una gran variedad de especies estimándose una cantidad de 200.000 especies. Principalmente, destacan por su elevada tasa de crecimiento lo que genera una ventaja en la productividad en comparación con las plantas terrestres.

Entre ellas se pueden diferenciar las cianobacterias (algas verdes-azuladas), las diatomeas (Bacillariophyceae), las algas verdes unicelulares (Chlorophyta y Charophyta) y otros grupos de microalgas flageladas como los dinoflagelados, las euglenas, los haptófitos y los criptófitos (2).

Además, podemos destacar los géneros *Chlorella* de las algas verdes y *Arthrospira* de las cianobacterias, en el consumo humano y la suplementación deportiva.

### 1.2.2. Macroalgas

Son conocidas habitualmente como algas marinas. Son organismos multicelulares y complejos que pueden agruparse formando bosques submarinos. Se clasifican en base a sus pigmentos fotosintéticos en tres grandes grupos (2).

- Algas verdes (Clorofitas): Poseen un color verde vibrante y un gran contenido en proteínas. Algunos ejemplos son la lechuga de mar (*Ulva spp.*) y la ulva de mar (*Caulerpa spp.*)
- Algas pardas (Feofitas): Dentro de este grupo encontramos algunas de las algas más grandes como los quelpos, el wakame (*Undaria pinnatifida*) y el kombu (*Saccharina japonica*). Destacan por tener una concentración elevada de polisacáridos como los alginatos, la fucoxantina y el fucoidano, con propiedades funcionales únicas.
- Algas rojas (Rodofitas): Son el grupo más primitivo con pigmentos únicos como la ficoeritrina. Entre ellas las más consumidas son el nori (*Porphyra spp.*) usado en la elaboración de sushi, la dulce (*Palmaria palmata*) y el musgo de Irlanda (*Chondrus crispus*) utilizado como espesante natural en la industria alimentaria.

Las macroalgas han sido introducidas en la dieta como “verduras marinas” siendo reconocidas gracias a su forma, mientras que las microalgas se están utilizando actualmente como suplementos dietéticos aportando gran densidad nutricional sobre todo en el mundo de la nutrición deportiva.

## 1.3. Composición nutricional general

Las algas contienen una densidad nutricional elevada de manera que forman parte de ellas macronutrientes de alta calidad y una gran cantidad de micronutrientes y de compuestos activos. A pesar de las diferencias que podemos observar entre la composición de diferentes especies, ofrecen una de las soluciones nutritivas sostenibles más importantes de origen no animal.

En relación al rendimiento deportivo, una de las características más importantes de las algas se encuentra en su composición proteica. Las microalgas, como la espirulina y la *Chlorella*, alcanzan concentraciones de proteínas entre el 50% y el 70% de su peso seco. Por otro lado, en las macroalgas diferenciamos entre las algas verdes y rojas que pueden presentar niveles de hasta un 47%, mientras que las algas pardas presentan entre el 5% y el 24% (6). Además

de la cantidad proteica que presentan, destaca la calidad de su composición, incluyendo los nueve aminoácidos esenciales que el ser humano no sintetiza. Es muy significativo para una persona deportista su alto contenido en BCAAs, como la leucina, la isoleucina y la valina, teniendo niveles similares a los de alimentos como la soja o el huevo, y ligeramente inferiores a los niveles presentes en la proteína de aislado de suero que destaca por su gran uso en suplementación deportiva (2). Estos aminoácidos son muy importantes para la salud y reparación del tejido muscular.

Por otro lado, las algas son reservas naturales de micronutrientes críticos. Son ricas tanto en vitaminas A, C, D, E, K y de todo el complejo B, como en minerales esenciales como el calcio, el magnesio, el potasio y el hierro (2). Se ha demostrado además que el hierro presente en algunas microalgas como la *Chlorella* presenta una biodisponibilidad superior a la de la carne de vacuno, de forma que puede utilizarse para prevenir situaciones como la de la anemia ferropénica que presentan los atletas con alta carga de entrenamiento (4). Además, contienen en su composición vitamina B12 ya sea en su forma activa (el nori y la *Chlorella*) o en su forma inactiva (espirulina), a pesar de que esta última no pueda ser aprovechada por el ser humano.

En último lugar, las algas destacan por sus compuestos activos. Estos organismos sintetizan diferentes compuestos como los carotenoides, como la astaxantina, la fucoxantina y la zeaxantina; y los polifenoles, como los florotaninos en las algas pardas, actuando como fuertes antioxidantes. Por ejemplo, la astaxantina ha demostrado tener una capacidad para neutralizar radicales libres muy por encima de la que presenta la vitamina E, de forma que puede disminuir el estrés oxidativo y la inflamación sistémica en deportistas (4). Por todas estas características, las algas son consideradas un gran recurso biotecnológico que puede tener un gran impacto en el rendimiento y la recuperación deportiva.

#### **1.4. Características y composición nutricional de *Ulva* spp. :**

El género *Ulva* spp. pertenece a la familia *Ulvaceae*. Dentro de este género se encuentra un conjunto de macroalgas verdes con características de gran importancia biorremediativa para el ecosistema y de gran relevancia biotecnológica. En el pasado se diferenciaba entre los géneros *Enteromorpha* spp. (formas tubulares) y *Ulva* spp.(formas laminares), pero con el tiempo se han unificado ambos en *Ulva*, debido a descubrimientos de secuenciación génica (7). Algunas de las especies de este género que más se estudian por su capacidad de generar biomasa masivas son *U. prolifera*, *U. linza* y *U. intestinalis*. Estas algas poseen un crecimiento extremadamente rápido, llegando a formar las conocidas “mareas verdes”.

A nivel nutricional, estas macroalgas son consideradas como alimentos funcionales o suplementos, gracias a su alto valor biológico. Destacan por ser ricas en proteínas, lípidos, fibras dietéticas y vitaminas esenciales, teniendo un gran uso tanto médico como alimentario. A pesar de esto, su principal componente es el ulvano presente en la pared celular, el cual es un polisacárido sulfatado soluble en agua que constituye generalmente un 18% de su peso en seco (1). El ulvano presenta una estructura química compleja, presentando un esqueleto lineal formado por L-ramnosa-3-sulfato, ácido D-glucurónico, ácido L-idurónico y D-xilosa. Sin embargo, la composición nutricional puede variar dependiendo de la especie, la temporada en la que se cosecha, el método de cultivo o las condiciones ambientales como la temperatura.

En último lugar, en el rendimiento deportivo y en la salud en general, *Ulva* spp. podría ser relevante ya que ha mostrado potencial en distintas actividades biológicas como las propiedades antioxidantes, antiinflamatorias e inmunomoduladoras que proporcionan sus biomoléculas bioactivas. Además, debido al ulvano y a sus derivados oligosacáridos han demostrado eliminar radicales libres (como el hidroxilo) y potenciar las capacidades de algunas enzimas antioxidantes como la superóxido dismutasa y la catalasa eficazmente (1) (6). Esto es esencial para combatir el estrés oxidativo del ejercicio de forma eficaz, además, para reducir la inflamación sistémica y optimizar la recuperación muscular, regulan la respuesta inmune. Su aporte a la salud metabólica del deportista aumenta gracias a sus efectos hipolipidémicos, contribuyendo a reducir los niveles de triglicéridos y colesterol, además de su capacidad para mejorar la homeostasis de la glucosa (6). Finalmente, es destacable la degradación de los polisacáridos en oligosacáridos que proporcionan mejores condiciones de solubilidad y biodisponibilidad del alga original, sin alterar sus propiedades fisiológicas.

## 1.5. Rendimiento y recuperación deportiva

El rendimiento deportivo describe la capacidad de un atleta para ejecutar una actividad física de manera eficiente y alcanzar resultados óptimos en relación con sus objetivos. Las estrategias nutricionales han ido evolucionando gracias a los diferentes descubrimientos sobre cómo afectaban al rendimiento del deportista. En primer lugar, estas estrategias se centraban en cubrir las demandas energéticas mediante la ingesta de carbohidratos y el estado hídrico mediante la correcta ingesta de fluidos. En la actualidad, la ciencia ha demostrado que centrar la nutrición en la optimización de la recuperación, la mejora del sistema inmunitario y la disminución del daño muscular puede ser igual de importante (4).

El ejercicio induce una respuesta biológica denominada hormesis, la cual constituye la base del rendimiento y la mejora física. Esto se produce mediante la señalización que es activada por el organismo, tras situaciones moderadas de estrés físico que conducen a adaptaciones fisiológicas beneficiosas como pueden ser la biogénesis mitocondrial o la capacidad antioxidante. Sin embargo, cuando se produce una situación de alta intensidad o de estrés elevado, se pueden producir especies reactivas de oxígeno (ROS) en exceso que provocarían un desequilibrio oxidativo, inflamación sistémica y mayor riesgo de sufrir infecciones, debido a que los ROS superan los niveles de defensas del organismo.

En el contexto deportivo, algunos de los limitantes en el rendimiento es la fatiga debida a factores como el estrés oxidativo, el gasto de las reservas de glucógeno, la deshidratación y la acidez muscular que aumenta con la acumulación de iones de hidrógeno (4). Además, la regulación de factores de transcripción como el NRF2 desempeña un papel fundamental. Aunque no interviene directamente en la capacidad cardiovascular, esta vía actúa como el regulador más importante de la defensa antioxidante celular, protegiendo las fibras musculares del estrés oxidativo generado por el esfuerzo de alta intensidad.

Por otro lado, el organismo restaura su homeostasis y repara el daño producido por el entrenamiento mediante el proceso llamado recuperación deportiva. En el caso de que la recuperación fuera deficiente se producirían síntomas como dolor muscular y deterioro de la capacidad inmune de las mucosas. El ejercicio intenso puede reducir los niveles de péptidos antimicrobianos (IgA o lisozima fecal), incrementando la capacidad de adquirir síntomas respiratorios negativos en atletas de alta intensidad (8), por lo que, en la actualidad se utilizan o se buscan estrategias para restaurar el sistema inmune perdido para que el deportista pueda mantener su nivel de entrenamiento y de competición en las mejores condiciones.

En conclusión, la búsqueda de un equilibrio entre el entrenamiento y la adaptación molecular del organismo mediante la nutrición funcional influye directamente en el rendimiento y la recuperación deportiva.

## **2. Objetivos**

### **Objetivo General**

Sintetizar la evidencia científica actual sobre el efecto del consumo de algas y sus compuestos bioactivos en el rendimiento físico y la recuperación muscular.

## Objetivos Específicos

- Describir las variables de rendimiento y recuperación utilizadas en los estudios revisados
- Analizar los mecanismos fisiológicos propuestos, especialmente los relacionados con estrés oxidativo, inflamación, metabolismo energético e inmunidad.
- Evaluar el potencial de *Ulva* spp. como ingrediente funcional en el contexto de la nutrición deportiva.

## 3. Metodología

### 3.1. Estrategia de búsqueda

Para la realización de este estudio de revisión bibliográfica narrativa se incluyeron estudios procedentes de la base de datos científicos PubMed perteneciente al Centro Nacional para la Información Biotecnológica (NCBI) de la Biblioteca Nacional de Medicina (NLM) de los Estados Unidos.

#### 3.1.1 Términos de búsqueda

Para la búsqueda de artículos realizada el 25/03/2026 se dividió en dos apartados diferentes. El primero basado en el rendimiento deportivo y el segundo basado en la recuperación. Estas dos búsquedas fueron realizadas por los términos Mesh referidos a las algas, a términos relacionados con el rendimiento deportivo y a la población a la que va referida, dando lugar a los resultados mostrados en las Tablas 1 y 2.

**Tabla 1.** Términos utilizados en la búsqueda de rendimiento deportivo en las algas

| ALGAS                   | RENDIMIENTO DEPORTIVO | POBLACIÓN |
|-------------------------|-----------------------|-----------|
| Seaweed supplementation | Performance           | Athletes  |
| Ulva                    | VO2Max <sup>1</sup>   | Healthy   |
| Marine algae            | Ergogenic aids        | Trained   |
| Microalgae              | Aerobic capacity      |           |
| Dietary algae           | Endurance training    |           |
| Green algae             |                       |           |

<sup>1</sup> Capacidad máxima de oxígeno

**Tabla 2.** Términos utilizados en la búsqueda de recuperación en las algas

| ALGAS                   | RECUPERACIÓN     | POBLACIÓN |
|-------------------------|------------------|-----------|
| Seaweed supplementation | Recovery         | Athletes  |
| Ulva                    | Muscle fatigue   | Healthy   |
| Marine algae            | Oxidative stress | Trained   |
| Microalgae              | Muscle damage    |           |
| Dietary algae           | Inflamma*        |           |
| Green algae             |                  |           |

Para la búsqueda en la base de datos Pubmed se utilizó el siguiente lenguaje de búsqueda booleano:

- Para rendimiento deportivo:

*("Seaweed" OR "Ulva" OR "Marine algae" OR "Microalgae" OR "Dietary algae" OR "Green algae") AND ("Performance" OR "VO2Max" OR "Ergogenic aids" OR "Aerobic capacity" OR "Endurance training") AND ("Athletes" OR "Healthy" OR "Trained")*

- Para recuperación:

*("Seaweed" OR "Ulva" OR "Marine algae" OR "Microalgae" OR "Dietary algae" OR "Green algae") AND ("Recovery" OR "Muscle fatigue" OR "Oxidative stress" OR "Muscle damage" OR "Inflamma\*") AND ("Athletes" OR "Healthy" OR "Trained")*

### 3.1.2. Criterios de selección

Como método de selección de los artículos se utilizaron diferentes criterios de inclusión: se seleccionaron artículos de los últimos 10 años, estudios en humanos, que dispusieran del texto completo gratuito y únicamente artículos en inglés.

Por tanto, tras estos criterios y tras realizar la búsqueda, se encontraron 33 artículos para rendimiento deportivo y 77 para recuperación. Sin embargo, tras una primera lectura se seleccionaron 8 para rendimiento deportivo y 10 para recuperación, debido a que no tenían una relación directa con el tema de trabajo o estudios habían sido realizados en animales.

## 4. Desarrollo

### 4.1. Comparativa estudios clínicos

A continuación, se presenta una tabla resumen que recoge los principales estudios clínicos incluidos en esta revisión, organizados por especie o compuesto bioactivo. Para cada estudio se especifica la población estudiada, la dosis y duración de la intervención, la variable fisiológica principal analizada, el resultado más relevante obtenido y el tipo de diseño experimental empleado.

**Tabla 3.** Resumen de estudios clínicos incluidos en la revisión

| <b>Especie /<br/>Compuesto</b>                             | <b>Población (n)</b>                                                                                   | <b>Dosis /<br/>Duración</b>                         | <b>Variable<br/>principal<br/>analizada</b>         | <b>Resultado<br/>principal</b>                             |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <i>Ulva</i> spp.<br>(polvo) (9)                            | Futbolistas y<br>balonmanistas<br>de élite (n=18)<br><br>Ensayo antes-<br>después sin<br>grupo control | 6 g/día / 30<br>días                                | Marcadores<br>metabólicos<br>(HbA1c, LDL,<br>TG)    | ↓ HbA1c (-4,73%)<br>↓ LDL (-4,94%)<br>↓ TG (-5,09%)        |
| <i>Tetraselmis<br/>chuii</i> (10)                          | Futbolistas<br>amateur<br>adultos sanos<br>(n=44)<br><br>ECA doble<br>ciego con<br>placebo             | 25 mg/día / 6<br>semanas                            | VO <sub>2</sub> max<br>absoluto y<br>relativo       | ↑ VO <sub>2</sub> max<br>↓ FC en umbrales<br>ventilatorios |
| Espirulina<br>( <i>Arthrospira<br/>platensis</i> )<br>(11) | Jugadores de<br>waterpolo de<br>alto<br>rendimiento<br>(n=20)                                          | 30 mL/día con<br>una<br>concentración<br>de 1 mg/mL | Percepción<br>del<br>rendimiento<br>(ASPS) y<br>CPK | ↓CPK<br>↓Tensión muscular<br>↑Rendimiento<br>subjetivo     |

|                                |                                                                          |                                                                                                                            |                                         |                                                              |
|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
|                                | Estudio observacional con grupo placebo                                  | de ficocianina. / 8 semanas                                                                                                |                                         |                                                              |
| <i>Chlorella vulgaris</i> (12) | Hombres jóvenes sanos (n=12 y 6)<br>ECA controlado con placebo           | Estudio 1 (n=12) → 3 semanas con 6g día + HIIT 3 veces a la semana<br><br>Estudio 2 (n=6) → 4 semanas con 6 g día sin HIIT | Función cardíaca y capacidad aeróbica   | ↑ Volumen sistólico<br>↑ Gasto cardíaco<br>↑ MAOD            |
| <i>Chlorella vulgaris</i> (13) | Voluntarios sanos masculinos (n=12)<br><br>ECA cruzado sin grupo placebo | Dosis única de 6 g durante un periodo de 14 días                                                                           | Carotenoides plasmáticos                | ↑ Luteína<br>↑ β-caroteno<br>↑ Zeaxantina en plasma          |
| Astaxantina (14)               | Taekwondistas jóvenes (n=42)<br><br>ECA doble ciego con placebo          | 12 mg/día / 4 semanas                                                                                                      | Potencia explosiva y daño muscular (CK) | ↑ Potencia explosiva desde sem. 1<br><br>↓ CK post-ejercicio |

|                                        |                                                                     |                        |                                                         |                                                                           |
|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| <i>Fucoidano</i><br>(algas pardas) (8) | Deportistas de alto rendimiento<br>Estudio piloto sin grupo control | 1 g/día / 4 semanas    | Lisozima fecal (inmunidad mucosa)                       | ↑ Lisozima fecal +45%<br>↑ Claudina-1 epitelial                           |
| <i>Param. Euglena gracilis</i> (15)    | Adultos sanos (n=60)<br>ECA doble ciego con placebo                 | 500 mg/día / 4 semanas | Fatiga subjetiva y SNA (ratio LF/HF)                    | ↓ Ratio LF/HF post-fatiga<br>↑ Rendimiento cognitivo                      |
| <i>Tetraselmis chuii</i> (16)          | Adultos sanos (n=22)<br>ECA cruzado con placebo                     | 25 mg/día / 3 semanas  | Expresión génica NRF2 en músculo y VO <sub>2</sub> peak | ↑ NRF2<br>↑ GPX7<br>↑ PRDX6 en músc. esquelético<br>↑ VO <sub>2</sub> max |

ASPS: Athletic Subjective Performance Scale (Escala de Rendimiento Subjetivo del Atleta); CK: creatina quinasa; CPK: creatina fosfoquinasa; ECA: ensayo clínico aleatorizado; FC: frecuencia cardíaca; GPX7: glutatión peroxidasa 7; HbA1c: hemoglobina glicosilada; HIIT: entrenamiento interválico de alta intensidad; LDL: lipoproteína de baja densidad; LF/HF: ratio baja frecuencia/alta frecuencia de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (marcador del sistema nervioso autónomo); MAOD: déficit máximo de oxígeno acumulado; memb.: membrana; músc.: músculo; NRF2: Nuclear Factor Erythroid 2-related factor 2; PRDX6: peroxiredoxina 6; sem.: semana; SNA: sistema nervioso autónomo; TG: triglicéridos; VO<sub>2</sub>max: consumo máximo de oxígeno; VO<sub>2</sub>peak: consumo pico de oxígeno. ↑: aumento; ↓: disminución (con respecto al grupo control/placebo)

## 4.2. Composición química de *Ulva* spp. y su relevancia deportiva

### 4.2.1. La pared celular: el ulvano

Uno de los principales puntos de interés del género *Ulva* es la complejidad de su pared celular. Se encuentra formada principalmente por ulvano, un polisacárido soluble en agua el cual constituye el 18% en peso seco del alga.

El ulvano es un polímero lineal compuesto por una sucesión compleja de monosacáridos cuya estructura incluye L-ramnosa-3-sulfato, ácido D-glucurónico, ácido L-idurónico y D-xilosa (17). Se organiza en unidades de disacáridos repetitivas, como la A3s (ácido glucurónico único a ramnosa sulfatada) y la B3s (ácido idurónico unido a ramnosa sulfatada). La configuración es dinámica, por ejemplo, en el caso de *Ulva Lactuca* que tiene una gran variabilidad estacional, el contenido de ácidos urónicos puede triplicarse entre julio y agosto (pasando de 0,62 g/100 g a 1,92 g /100g) lo que significa que es importante el momento en el que se recoge y se cosecha para obtener unas propiedades específicas. Por último, según el método de extracción también puede variar el perfil nutricional. Entre ellos destacan la extracción ácida preservando mejor la ramnosa y la xilosa, y la extracción enzimática-química más enfocada en la obtención de glucosa y ácido urónico.

### 4.2.2. Perfil nutricional y compuestos bioactivos

*Ulva* spp. incluye la siguiente distribución nutricional:

- Proteínas y aminoácidos: elevada biodisponibilidad para la reparación de tejidos post-ejercicio. Las proteínas se encuentran principalmente en forma de proteínas de membrana y enzimas metabólicas. Respecto al contenido en aminoácidos, es rica en ácido aspártico y ácido glutámico, además de contener niveles significativos de leucina, valina e isoleucina (BCAAs), fundamentales para la síntesis de proteína muscular, y glicina, como precursor de colágeno y creatina. Sin embargo, su densidad proteica es inferior al 90% que caracteriza al aislado de suero lácteo. En términos de leucina, no alcanza la concentración específica presente en el suero lácteo que suele estar entre el 7 y 10%.
- Lípidos y fibras: presenta un contenido en grasas bastante bajo (0,90 g por cada 100 g), aunque contiene cantidades más altas de fibras dietéticas tanto solubles como insolubles (23 g/ 100 g), las cuales modulan la respuesta glucémica y lipídica. El perfil graso está formado principalmente por ácidos grasos poliinsaturados como el Omega-3, con una relación Omega-6/Omega-3 muy baja confiriéndole propiedades

antiinflamatorias. También contiene una alta proporción de lípidos polares como los glicolípidos y los fosfolípidos, esenciales para la integridad de las membranas celulares del tejido muscular dañado durante el ejercicio, y esteroides como el isofucoesterol, con efectos antioxidantes (3).

- Fitoquímicos: es destacable la elevada cantidad de carotenoides y polifenoles totales (2070 mg GAE/kg; GAE: Gallic Acid Equivalents), comparable o incluso superior a la del aceite de oliva virgen extra de alta calidad, cuyos valores suelen oscilar entre los 200 y 800 mg GAE/kg, o a la de frutas ricas en antioxidantes como las fresas (~1500-2000 mg GAE/kg). Además, adquieren una capacidad antioxidante muy elevada de 490 mg Trolox/kg. El Trolox es el estándar analítico para medir la actividad de la Vitamina E (alfa-tocoferol). Por tanto, 490 mg Trolox/kg indica que 1 kg de esta alga tiene una capacidad de neutralización de radicales libres equivalente a 490 mg de Vitamina E de alta potencia. Asimismo, esta cantidad sitúa a la macroalga en una posición que compite directamente con el tomate y supera la capacidad protectora basal de la mayoría de los vegetales terrestres de hoja verde como la espinaca o la lechuga.

**Tabla 4.** Información nutricional de *Ulva* spp. (9)

| Categoría                                                     | Parámetro                 | Valor                                                       |
|---------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>Composición proximal</b>                                   | Proteína total            | 8.46% ( <i>U. lactuca</i> ) - 27.2% ( <i>U. clathrata</i> ) |
|                                                               | Lípidos totales           | 0.90 g/100g - 7.87 g/100g                                   |
|                                                               | Cenizas (ashes)           | 19.59% - 27.5%                                              |
| <b>Fibra dietética</b>                                        | Fibra soluble             | 20.53 - 21.9 g/100g                                         |
|                                                               | Fibra insoluble           | 18.7 - 34.37 g/100g                                         |
|                                                               | Ulvano (en pared celular) | ~18% del peso en seco                                       |
| <b>Minerales (mg/100g DW)</b><br>(Datos de <i>U. rigida</i> ) | Magnesio (Mg)             | 2094.1                                                      |
|                                                               | Hierro (Fe)               | 283.0                                                       |
|                                                               | Sodio (Na)                | 1595.0                                                      |

|                                  |                                  |                       |
|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
|                                  | Potasio (K)                      | 1561.0                |
|                                  | Calcio (Ca)                      | 524.5                 |
|                                  | Fósforo (P)                      | 210.0                 |
|                                  | Zinc (Zn)                        | 0.60                  |
|                                  | Cobre (Cu)                       | 0.50                  |
| <b>Perfil Lipídico</b>           | Ácido palmítico (16:0)           | 20.2% del total de AG |
| (% de Ácidos Grasos)             | Ácido estearidónico (18:4 n-3)   | 24.4% del total de AG |
|                                  | Ácido alfa-linolénico (18:3 n-3) | 10.9% del total de AG |
|                                  | EPA (20:5 n-3)                   | 0.87% - 1.4%          |
|                                  | DHA (22:6 n-3)                   | 0.8%                  |
| <b>Índices de Salud Lipídica</b> | Índice de Aterogenicidad (AI)    | 0.3                   |
|                                  | Índice de Trombogenicidad (TI)   | 0.1                   |
| <b>Fitoquímicos y redox</b>      | Polifenoles totales              | 2070 mg GAE/kg        |
|                                  | Capacidad antioxidante           | 490 mg Trolox/kg      |
|                                  | Actividad ABTS (IC50)            | 30.7 ± 0.1 µg/mL      |

*ABTS: 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolin-6-ácido sulfónico), método de medición de la capacidad antioxidante; AG: ácidos grasos; DHA: ácido docosahexaenoico (22:6 n-3); DW: peso seco (del inglés dry weight); EPA: ácido eicosapentaenoico (20:5 n-3; GAE: equivalentes de ácido gálico (del inglés Gallic Acid Equivalents); IC50: concentración inhibitoria media.*

#### 4.2.3. Impacto en el metabolismo del deportista

Según unos estudios realizados en atletas profesionales de fútbol y balonmano que consumieron 6 g diarios de *Ulva* spp. en polvo durante un período de 30 días se demuestran unas mejoras significativas en marcadores metabólicos como una disminución de la hemoglobina glicosilada (HbA1c) y en los niveles de triglicéridos y colesterol LDL. (9) Por lo tanto, se confirma el efecto hipolipemiante que proporcionan las fibras y el ulvano aumentando

la excreción de ácidos biliares y mejorando la sensibilidad a la insulina. Además, su efecto anti-hiperglucemiante permite al deportista mantener los niveles de energía estables y optimizar la oxidación de grasas durante largos esfuerzos.

**Tabla 5.** Impacto de la suplementación con algas en marcadores metabólicos pre y post ensayo. (9)

| <b>Marcador metabólico</b>             | <b>Valor<br/>pre-ensayo<br/>(media)</b> | <b>Valor<br/>post-ensayo<br/>(media)</b> | <b>Disminución<br/>(%)</b> |
|----------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------|
| <b>Hemoglobina glicosilada (HbA1c)</b> | 5,07%                                   | 4,83%                                    | -4,73%                     |
| <b>Colesterol LDL</b>                  | 93,20 mg/dL                             | 88,60 mg/dL                              | -4,94%                     |
| <b>Triglicéridos (TG)</b>              | 70,70 mg/dL                             | 67,10 mg/dL                              | -5,09%                     |

#### 4.2.4. Mitigación del estrés oxidativo y activación de las vías NRF2

Tras la realización de ejercicio de alta intensidad se generan especies reactivas de oxígeno (ROS) en exceso (4). Algunas de estas especies son el superóxido y el hidroxilo, las cuales pueden dañar las membranas mitocondriales y otras estructuras macromoleculares pudiendo reducir el rendimiento. El consumo de *Ulva* spp. podría ayudar a reducir el daño oxidativo mediante dos mecanismos.

En primer lugar, la suplementación reduce el daño lipídico, previniendo o atenuando el proceso de peroxidación lipídica, lo que resulta en una menor formación de malondialdehído. Por otro lado, se produce una modulación enzimática que promueve el incremento de la actividad de la catalasa y la superóxido dismutasa (6). Todo ello ocurre a través de la vía NRF2, que regula la respuesta antioxidante (9). Algunos compuestos bioactivos presentes en las algas verdes, como los polifenoles o los carotenoides entre ellos la luteína y el  $\beta$ -caroteno, activan la transcripción de genes protectores adaptando positivamente las mitocondrias al estrés producido por el ejercicio (mitohormesis) (9).

#### 4.2.5. Regulación inflamatoria, inmunológica y hormonal

Para la recuperación deportiva es importante también la restauración de la homeostasis hormonal e inmunitaria.

- Marcadores inflamatorios: se observaron reducciones importantes en los niveles de mieloperoxidasa y en la velocidad de sedimentación globular tras la suplementación con *Ulva* spp (3). Estos parámetros están relacionados con los niveles de inflamación sistémica y el daño tisular.
- Regulación del cortisol: tras la suplementación se ha observado una disminución significativa en los niveles de cortisol en sangre (11). Esta reducción demostraría las propiedades adaptógenas del alga favoreciendo un entorno anabólico tras el esfuerzo, debido a que el cortisol es una hormona catabólica que se eleva ante el estrés físico.
- Capacidad inmunológica: los polisacáridos marinos pueden restaurar las concentraciones de lisozima, el cual es un péptido antimicrobiano que previene las infecciones respiratorias en deportistas de élite, cuya inmunidad es alterada tras periodos de gran intensidad física (8).

#### 4.2.6. Implicación práctica en el rendimiento

Se ha evidenciado que *Ulva* spp. (específicamente *Ulva Lactuca*) es nutricionalmente favorable a nivel deportivo (9). Este suplemento, mejora la resiliencia fisiológica, definida como la capacidad biológica del organismo para mantener la homeostasis durante el esfuerzo físico y restaurar con rapidez la estabilidad interna tras la fatiga, mediante la modulación del estrés y la aceleración de la eliminación de los subproductos generados por el metabolismo (9). A nivel de preparación competitiva, mejora la consistencia de entrenamiento y la recuperación, de forma que las algas verdes son un suplemento muy útil para el rendimiento deportivo.

### 4.3. Comparativa de especies

#### 4.3.1. Diferencias biológicas y bioquímicas

Con el objetivo de contextualizar las diferencias existentes entre las principales especies de algas estudiadas en esta revisión, la siguiente tabla recoge de forma comparativa los compuestos bioactivos más relevantes de cada una, la variable fisiológica sobre la que actúan, el hallazgo principal reportado en los estudios y las limitaciones más destacadas asociadas a cada especie. Esto permite identificar qué especie resulta más adecuada en función del objetivo deportivo, ya sea la mejora del rendimiento aeróbico, la optimización de marcadores metabólicos o la protección frente al daño muscular inducido por el ejercicio.

**Tabla 6.** Diferencias biológicas y bioquímicas de especies diferentes

| Especie/<br>género                                                            | Compuesto<br>bioactivo                     | Variable<br>fisiológica<br>modificada          | Hallazgo del<br>estudio                                                                                                | Limitaciones                                                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Ulva</i> spp.<br>(macroalga)<br>(2) (3) (6)<br>(9)                         | Ulvano<br>(polisacárido<br>sulfatado)      | Perfil<br>lipídico y<br>glucémico              | ↓ LDL (-4,94%)<br>↓ Triglicéridos (-<br>5,09%)<br>↓ HbA1c (-4,73%)<br>en atletas de élite<br>tras 30 días<br>(6g/día). | El contenido de<br>ácidos urónicos<br>puede triplicarse en<br>un solo mes,<br>alterando su eficacia.                                  |
| <i>Chlorella</i><br><i>vulgaris</i><br>(microalga)<br>(1) (2) (4)<br>(12)(13) | Carotenoides<br>(luteína y β-<br>caroteno) | Capacidad<br>aeróbica y<br>función<br>cardíaca | ↑ Volumen sistólico<br>↑ Gasto cardíaco,<br>facilitando una<br>mayor entrega de<br>oxígeno a los<br>tejidos.           | Pared celular rígida:<br>es indigerible para el<br>ser humano si no se<br>rompe mecánica o<br>enzimáticamente<br>antes de su consumo. |
| <i>Arthrospira</i><br><i>platensis</i><br>(espirulina)<br>(1) (2) (4)<br>(11) | Ficocianina<br>(pigmento<br>antioxidante)  | Potencia<br>explosiva y<br>fatiga<br>láctica   | ↑ Potencia de<br>salida en esprints<br>↓ Lactato sanguíneo<br>↓ Frecuencia<br>cardíaca<br>submáxima en<br>ciclistas.   | Pseudo-vitamina<br>B12: la mayor parte<br>de su B12 es una<br>forma inactiva que el<br>cuerpo humano no<br>puede aprovechar.          |
| <i>Tetraselmis</i><br><i>chuii</i><br>(microalga)<br>(10) (16)                | Activadores<br>de la vía<br>NRF2           | VO <sub>2</sub> max y<br>estrés<br>oxidativo   | ↑ VO <sub>2</sub> max absoluto<br>y relativo en<br>futbolistas amateur<br>(25 mg/día).                                 | Aunque los<br>resultados son<br>potentes, el número<br>de ensayos clínicos<br>en humanos sigue<br>siendo limitado                     |

#### 4.3.2. Diferencias en el rendimiento deportivo

Cada especie actúa de forma diferente en la condición deportiva y la capacidad física de la persona que es suplementada mediante una de estas especies.

- *Chlorella* spp.: mejora la capacidad cardio-respiratoria y anaeróbica mostrando resultados de mejora en el consumo máximo de oxígeno y la capacidad aeróbica (12). Su mecanismo consiste en incrementar el volumen sistólico máximo (VSmáx) y el gasto cardíaco máximo (Qmáx) alcanzables durante el ejercicio de alta intensidad, ampliando así la capacidad de transporte de oxígeno a los tejidos en condiciones de esfuerzo máximo. Se produce el aumento del Déficit de Oxígeno Acumulado Máximo (MAOD), el cual es considerado muy importante para medir la capacidad anaeróbica, lo que significa que el deportista puede obtener más energía de fuentes que no dependen del oxígeno durante esfuerzos máximos, lo cual se vincula con la capacidad buffer, que es la habilidad del músculo para seguir trabajando a pesar de la acumulación de acidez (iones de hidrógeno) y lactato, de forma que se optimiza el metabolismo glucolítico.
- *Ulva* spp.: actúa como un modulador metabólico ya que se ha documentado su capacidad de reducción de hemoglobina glicosilada (HbA1c), el colesterol LDL y los triglicéridos (9). Esto permite al deportista mantener los niveles de energía y optimizando la oxidación de sustratos durante ejercicios de resistencia largos.
- Espirulina: parece que mejora el rendimiento medio a nivel subjetivo, sobre todo en deportes de alta intensidad como el waterpolo (estudio realizado en jugadores de waterpolo con suplementación de espirulina) (11). Esta mejora subjetiva significa que hay una menor percepción de la fatiga y mayor eficiencia en gestos técnicos.

#### 4.3.3. Recuperación y resiliencia fisiológica

Cada especie de alga ofrece distintas estrategias mediante las cuales proporcionan protección tras el esfuerzo físico.

-Defensa antioxidante: *Chlorella* spp. eleva los niveles plasmáticos de carotenoides protegiendo las membranas celulares del daño lipídico de manera muy rápida (13). Por otro lado, *Ulva* spp. potencia la actividad enzimática antioxidante endógena indirectamente a través de la vía NRF2 (9). Por último, la espirulina aumenta las concentraciones de glutatión reducido y atenúa la peroxidación lipídica que induce la actividad física (11).

-Efecto antiinflamatorio y hormonal: *Ulva* tiene una gran capacidad para reducir marcadores relacionados con el daño inflamatorio sistémico (mieloperoxidasa) (9). También, se encarga de mitigar los niveles de cortisol favoreciendo la aceleración de la reparación de los tejidos (9). Por otro lado, la espirulina reduce la tensión muscular de forma que protege al músculo de sufrir un desgaste elevado tras una actividad intensa (4).

-Modulación del sistema inmune: mediante vías distintas, todas las especies defienden el sistema inmune. *Ulva* spp. estimula mediante sus polisacáridos la fagocitosis de macrófagos

y la secreción de citocinas (3). *Chlorella* spp., incrementa la cantidad de secreción de inmunoglobulina A salival, aumentando la inmunidad de las mucosas y de esta forma, disminuyendo la probabilidad de coger infecciones respiratorias, las cuales son comunes en atletas profesionales tras periodos intensos de ejercicio (12).

**Tabla 7.** Comparativa de mecanismos antioxidantes y de recuperación por especie

| <b>Especie</b>                               | <b>Activación NRF2</b>   | <b>↓ MDA / peroxid. lipídica</b> | <b>↑ Actividad SOD/CAT</b> | <b>↓ CK / CPK</b> | <b>↑ Inmun. mucosa</b> |
|----------------------------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------|------------------------|
| <i>Ulva</i> spp. (9)                         | ✓ (indirecta via polif.) | ✓                                | Parcial                    | ✓ (↓ mieloperox.) | Parcial (macrófagos)   |
| <i>Tetraselmis chuii</i> (16)                | ✓ (SIRT1/JUN)            | ✓                                | ✓ (SOD)                    | ✓                 | ✓ (NRF2↓TNF-α)         |
| <i>Spirulina</i> (A. <i>platensis</i> ) (11) | Parcial (NF-κβ)          | ✓ (↓ perox. lip.)                | ✓                          | ✓ (↓ CPK)         | ✓ (fagocitosis)        |
| <i>Chlorella vulgaris</i> (12) (13)          | Parcial                  | ✓ (carotenoides)                 | Parcial                    | –                 | ✓ (↑ slgA salival)     |
| <i>Astaxantina</i> (14)                      | ✓ (lipofílica, direc.)   | ✓ (memb. mitoc.)                 | ✓                          | ✓ (↓ CK excent.)  | –                      |
| <i>Fucoidano</i> (8)                         | Parcial                  | ✓                                | ✓                          | Parcial           | ✓ (↑ lisozima +45%)    |
| <i>Param. Euglena gracilis</i> (15)          | Parcial                  | ✓                                | ✓                          | –                 | ✓ (↑ slgA)             |

✓: evidencia presente; Parcial: efectos observados de forma indirecta o en algunos estudios; –: sin evidencia reportada. BAP: Potencial antioxidante en suero (Biological Antioxidant Potential); CAT: Catalasa; CK/CPK: Creatina quinasa/creatina fosfoquinasa; GSH: Glutación reducido; MDA: Malondialdehído; slgA: Inmunoglobulina A salival; SOD: Superóxido dismutasa.

## 4.4. Las algas en el rendimiento aeróbico y en la potencia/fuerza

En el mundo del deporte actual se diferencian en dos partes independientes la capacidad de resistencia aeróbica y la fuerza o potencia. Algunas disciplinas como el fútbol, el waterpolo, o el taekwondo involucran acciones explosivas para las que se necesita un óptimo desarrollo de la potencia, sobre una base aeróbica sólida para contar con una buena recuperación entre esfuerzos. Hay evidencia actualmente de que algunos compuestos marinos pueden servir como suplementos que sirven de apoyo para ambas partes.

### 4.4.1. Rendimiento Aeróbico

La capacidad aeróbica es la habilidad del organismo para sustentar ejercicios prolongados utilizando oxígeno como uno de los elementos más importantes en el proceso de adquisición de energía, mejorando la resistencia cardiovascular y la salud general. Uno de los indicadores principales de la resistencia aeróbica es el consumo máximo de oxígeno ( $VO_{2max}$ ) y existen resultados importantes en esta área sobre las algas verdes, como por ejemplo con los estudios realizados en *Tetraselmis chuii* (TC) o con los estudios realizados con astaxantina (1).

- Optimización del consumo de oxígeno máximo: en un estudio realizado con futbolistas amateur, adulto y sanos, los cuales recibieron 25 mg/día de suplementación de TC se ha demostrado un aumento significativo del consumo de oxígeno máximo absoluto y relativo (10). Esto puede ser debido a una mejora en el pulso de oxígeno, el cual define el volumen de oxígeno consumido por el organismo en cada latido cardíaco, y por un aumento en las concentraciones de hemoglobina y hemoglobina corpuscular media. Al disponer de una mayor capacidad de transporte de oxígeno, éste llega de manera mucho más óptima a los tejidos durante la realización del ejercicio.
- Función cardiovascular: reducción de la frecuencia cardíaca tanto en reposo como en intensidades con umbrales ventilatorios 1 y 2 tras la ingesta con TC, debido a que las arterias se vuelven más flexibles y menos rígidas gracias a los nutrientes como el potasio y los ácidos grasos insaturados del alga. (1) (10) Por tanto, se reduciría el gasto cardíaco.
- Oxidación de ácidos grasos: se ha demostrado que la astaxantina con una dosis de 12 mg/día ha demostrado tener la capacidad de potenciar la oxidación de grasas durante el final de la realización de ejercicios de resistencia (18). De esta forma, se permite que el organismo utilice como principal fuente de energía los lípidos, gastando menos glucógeno muscular y retrasando la fatiga.

#### 4.4.2. Rendimiento a nivel de fuerza y potencia

Las algas tienen la capacidad de actuar sobre la estructura y la contracción muscular controlando la forma en la que actúa la fuerza máxima y la potencia explosiva.

- Aumento potencia explosiva: la suplementación con astaxantina aumentó en gran medida el rendimiento de un grupo de 42 atletas de taekwondo en una prueba que consistía en realizar una patada de doble salto midiendo la potencia explosiva durante 20 segundos con el uso de un dispositivo (14). Esto se observó desde la primera semana de suplementación y es debido a una mejora en el recambio de ATP durante contracciones máximas repetidas y una mejora del balance redox mitocondrial.
- Eficiencia neuromuscular: hay otras algas como la espirulina cuya acción parece influir en la reducción de la tensión muscular y en mejorar la eficiencia en la aplicación de la fuerza en ciertos deportes (4). Esto se estudió con un grupo de jugadores de waterpolo cuyo rendimiento aumentó significativamente, de forma que gracias al poder antiinflamatorio que proporcionaba esta suplementación, los atletas mantenían una técnica de alta intensidad con una menor fatiga (11). Sin embargo, habría que realizar ensayos más amplios para comprobar realmente esta veracidad.

#### 4.4.3. Vía NRF2 y retraso de la fatiga

El estrés oxidativo generado por el ejercicio intenso y causado por la fatiga establece la relación entre la resistencia y la potencia.

- Activación de la vía NRF2: esta vía actúa como un importante regulador de la defensa antioxidante y se ha demostrado que puede ser activado por *Tetraselmis chuii* (16). La activación de esta vía produce un incremento significativo en el músculo esquelético humano de la glutatión peroxidasa (GPX7) y de la peroxiredoxina (PRDX6) (16). De esta forma, estas enzimas eliminan el peróxido de hidrógeno, protegiendo las proteínas contráctiles del daño oxidativo y optimizando el rendimiento aeróbico y anaeróbico.
- Las algas podrían favorecer la biogénesis mitocondrial debido a la activación de reguladores como SIRT1 y quinasas de señalización como MAPK (1). Si la cantidad de mitocondrias en el músculo es mayor, los depósitos de fosfocreatina son recuperados por el músculo rápidamente, permitiendo que se repitan esfuerzos en los que está involucrada la potencia proveniente de la fuerza gracias a una base de resistencia aeróbica.
- Otros compuestos provenientes de algas como el fucoidano, han demostrado restaurar el nivel de lisozima, un marcador de inmunidad de las mucosas, que se pierde tras la

realización de un ejercicio de extrema resistencia (8). Es importante mantener estos niveles para que el deportista pueda mantener una consistencia durante el entrenamiento para conseguir desarrollar sus aptitudes físicas de rendimiento y fuerza con el tiempo.

Como conclusión, existe una ventaja importante en el consumo de las algas que actúa tanto a nivel de resistencia mediante el perfil cardiovascular y hematológico, como a nivel de fuerza y potencia evitando que se pierda durante el ejercicio gracias a la protección de las mitocondrias y el ahorro de glucógeno mediante la oxidación de grasas. Todo esto mejora en gran medida el rendimiento del deportista.

## **4.5. Recuperación post-ejercicio y estrés oxidativo**

Para permitir una buena continuidad de entrenamiento sin lesiones es importante una recuperación efectiva tras la realización de un esfuerzo físico. El estrés oxidativo es el producto del desequilibrio redox generado por un ejercicio intenso y se caracteriza por la producción de gran cantidad de especies reactivas de oxígeno y nitrógeno (RONS), las cuales producen daño en las membranas celulares y en las proteínas estructurales del músculo. Se ha demostrado que la suplementación con algas o los diferentes compuestos bioactivos que contienen, aceleran la restauración de la homeostasis intracelular.

### **4.5.1. Disminución de marcadores de daño muscular**

El daño muscular se puede detectar mediante la presencia de distintos marcadores como la enzima creatina quinasa (CK). Estos marcadores se encuentran en el suero e indican de forma indirecta la alteración o el daño muscular inducido por el ejercicio.

- Astaxantina: es un carotenoide lipofílico que actúa de forma directa en las mitocondrias, protegiendo sus membranas contra la peroxidación lipídica. Un estudio en el que se administraban 12 mg/día de astaxantina a un grupo de taekwondistas ha demostrado reducir de forma significativa los biomarcadores de daño muscular como la CK tras la realización de ejercicio excéntrico y de resistencia, reparando eficazmente el músculo mediante el mantenimiento del balance redox mitocondrial (14).

- Ficocianina (espirulina): la administración de un extracto de espirulina de 1mg/mL de ficocianina en un grupo de jugadores de waterpolo de alto rendimiento mostró como se redujo el aumento de CK tras la realización de entrenamientos intensos (11). Asimismo, el grupo que recibió la suplementación presentó niveles inferiores al grupo control además de una mejora

significativa en la Escala de Rendimiento Subjetivo del Atleta (ASPS), lo que significaría en una menor tensión muscular relacionada con una mejor recuperación muscular (11).

#### 4.5.2. Activación de la vía antioxidante endógena (NRF2)

Existen algas con poder antioxidante que actúan como moduladores transcripcionales. Un ejemplo de estas es *Tetraselmis chuii*.

El factor NRF2 (Nuclear Factor Erythroid 2-related factor 2) es considerado el regulador maestro de la respuesta antioxidante celular, ya que controla la expresión de más de 200 genes vitales para la homeostasis. En condiciones normales, el NRF2 se encuentra secuestrado en el citoplasma por la proteína Keap1. Sin embargo, la suplementación con microalgas, especialmente con *Tetraselmis chuii*, ha demostrado ser capaz de inducir su activación transcripcional de manera significativa en el tejido muscular humano (16).

La activación de esta vía tras la ingesta del alga ocurre a través de una compleja cascada de señalización. En primer lugar, se ha observado que tras la suplementación con *T. chuii* se induce un aumento del mRNA de NRF2 y SIRT1 en el músculo esquelético. A nivel post-traducciona, el incremento de SIRT1 permite la desacetilación de la proteína NRF2, lo que potencia su estabilidad y facilita su translocación al núcleo al dificultar su degradación. NRF2 logra evadir el secuestro de Keap1 gracias a un estímulo hormético mediado por un aumento controlado de ROS y a la acción de proteínas como GSTM3, que protegen a NRF2 de la ubiquitinación. Una vez en el núcleo, NRF2 puede dimerizarse con componentes de la familia JUN para unirse a los elementos ARE, optimizando la respuesta antioxidante celular.

Por otro lado, las algas también pueden aumentar la expresión de enzimas pro-oxidantes (como PLA2G12A), generando un aumento fisiológico en las ROS. Esto genera un estímulo que activa la vía NRF2, preparando a la célula contra situaciones de estrés oxidativo mayores, como los producidos durante el ejercicio intenso. Además, la activación de esta vía de señalización inducida por algas se encarga de neutralizar los radicales libres como el peróxido de hidrógeno el cual es un subproducto crítico del metabolismo energético generado por el deporte. Su eliminación se produce gracias a que el factor NRF2 activa la producción de enzimas como la glutatión peroxidasa 7 (GPX7) y la peroxiredoxina 6 (PRDX6), de forma que se reduce el daño oxidativo de forma persistente (16).

Por último, la vía NRF2 se relaciona directamente con la protección celular mediante la formación de nuevas mitocondrias. Además, se ha descubierto que los atletas con mayores niveles de fatiga son quienes obtienen un mayor beneficio por parte de esta vía a partir de dicha suplementación (16).

#### 4.5.3. Recuperación del sistema autónomo y reducción de la fatiga

La fatiga se define como disminución de la capacidad y eficiencia para realizar actividades tanto físicas como mentales. Este estado se manifiesta a nivel fisiológico mediante una desregulación de la homeostasis, que implica interacciones entre los sistemas nervioso, endocrino e inmunitario. Por lo tanto, la recuperación no solo es muscular, sino también neurológica y sistémica.

Por un lado, la recuperación post-esfuerzo depende críticamente de la capacidad del cuerpo para pasar de un estado de dominancia simpática (estrés) a uno parasimpático (descanso). En un estudio del sistema nervioso autónomo (SNA) la relación (LF/HF) entre el componente de baja frecuencia (LF) que simboliza la actividad simpática, y el componente de alta frecuencia (HF) que indica la actividad parasimpática, aumenta durante la fatiga, reflejando un estrés persistente (15). La suplementación con paramilón ( $\beta$ -1,3-glucano) derivado de la especie *Euglena gracilis* ha demostrado normalizar de forma más rápida este balance (15). Se observó que los individuos que formaron parte de este ensayo mostraron niveles menores de la relación LF/HF a las 2 horas de haber finalizado una carga de fatiga tras recibir la suplementación indicada, sugiriendo que este compuesto promueve la activación parasimpática temprana acelerando la recuperación (15). También, existen otros casos como la reducción de la frecuencia cardíaca tanto en reposo como durante el esfuerzo físico, producida por el uso de microalgas verdes como *Tetraselmis chuii* la cual influye en la respuesta autónoma al ejercicio (10).

Por otro lado, la fatiga mental reduce la capacidad de iniciar o mantener tareas que requieren atención y motivación. Tras la realización de pruebas neuropsicológicas como el Advanced Trail Making Test, la suplementación con paramilón permitió mantener la eficiencia del trabajo durante más tiempo, lo que indica que las algas ayudan a preservar la atención selectiva, evitando el deterioro cognitivo provocado por el esfuerzo a largo plazo (15). Además, en un estudio realizado en jugadores de waterpolo con suplementación con espirulina, se obtuvieron mejoras importantes en la Escala de Rendimiento Subjetivo del Atleta, de forma que los deportistas notaron una reducción significativa de la tensión muscular y del estrés percibido, muestra de una recuperación mayor (11).

Por último, la acumulación de fatiga puede derivar en fatiga crónica si no se equilibra de forma óptima el daño celular y la inmunodepresión. Se ha observado que el paramilón de *Euglena* aumenta el potencial antioxidante en suero (BAP) sin aumentar los niveles de estrés oxidativo sistémico (15). Esto permite al organismo neutralizar especies reactivas de oxígeno (ROS) producidas por el exceso de actividad celular antes de que induzcan daño tisular liberando citocinas que den lugar al estado de fatiga.

#### 4.5.4. Modulación del sistema inmune y restauración de mucosas

El sistema inmunitario es alterado por el ejercicio y el entrenamiento de alta intensidad, de forma que incrementa la probabilidad de contraer infecciones respiratorias, ya que se produce el descenso de marcadores de defensa como la inmunoglobulina A salival (sIgA) debido a la fatiga intensa. La suplementación con biopolímeros marinos previene que se produzca este descenso restaurando las mucosas (16).

En primer lugar, se ha demostrado que el fucoidano, un polisacárido derivado de las algas pardas, tiene una gran capacidad para restaurar las defensas innatas del tracto digestivo, mediante el aumento sobre las concentraciones de lisozima fecal. Está documentado que los deportistas de élite presentan niveles inferiores de lisozima que los adultos sanos, aunque se logró incrementar estos niveles en un 45% gracias a la suplementación con 1 g diario de este polisacárido (8). Mediante el aumento de lisozima, se favorecen las acciones antimicrobianas y antiinflamatorias, la integridad de la barrera mucosa y la expresión de algunas proteínas como la claudina-1, protegiendo el epitelio del estrés térmico y mecánico producido por el ejercicio (13).

De forma complementaria, el paramilón de *Euglena gracilis* estimula la secreción de sIgA, reforzando la defensa aeróbica. Su acción funciona de tal manera que protege las vías respiratorias superiores de la posible colonización de patógenos oportunistas (15). Por otro lado, la suplementación con espirulina potencia tanto la inmunidad innata como la adaptativa activando la fagocitosis y mejorando la función de los linfocitos B y los monocitos. Este es un proceso controlado por diferentes vías de señalización entre las que encontramos las vías NF- $\kappa$ B, MAPK y JAK/STAT (16).

Por último, la microalga *T. chuii* aporta también un beneficio a la defensa inmune gracias a su acción regulando transcripcionalmente la inflamación mediante la vía NRF2 (16). Este factor disminuye la expresión de citocinas proinflamatorias como el TNF- $\alpha$  y la IL-6, favoreciendo una disminución de la inflamación y una rápida reparación de los tejidos musculares y mucosos sin alterar la respuesta adaptativa del organismo (16).

## 5. Conclusiones

Durante el trabajo, se ha analizado ampliamente el potencial de las algas como herramienta nutricional en la optimización del rendimiento y la recuperación deportiva. Las conclusiones obtenidas a partir de la evidencia científica son las siguientes:

- El género *Ulva* no es solo una fuente vegetal rica en proteínas bioactivas, sino que su valor más importante reside en los ulvanos, unos polisacáridos sulfatados que muestran indicios de actuar como potentes agentes antioxidantes y reguladores metabólicos. Algunos estudios sugieren que esto podría contribuir a mejorar el perfil lipídico y la homeostasis de la glucosa, los cuales son factores muy relevantes para la eficiencia energética del atleta.
- La suplementación con microalgas como *Tetraselmis chuii* y *Chlorella* parece asociarse con una elevación del consumo máximo de oxígeno producido tras una mejora del perfil hematológico y una reducción de la frecuencia cardíaca en intensidades submáximas. Además, hay indicios de que otros compuestos como la astaxantina podrían potenciar la oxidación de grasas, lo que permitiría un ahorro de glucógeno en la realización prolongada de ejercicios de resistencia.
- La astaxantina, en el ámbito anaeróbico, muestra potencial ergogénico a través de mecanismos relacionados con mejorar el recambio de ATP y proteger la integridad mitocondrial. Algunos estudios en atletas de taekwondo han reportado mejoras en la potencia explosiva y la coordinación neuromuscular, aunque el número de trabajos disponibles es limitado y sus muestras reducidas impiden extraer conclusiones definitivas.
- El paramilón de *Euglena gracilis* parece mostrar un efecto tras suplementación en el que se produce una reducción de la sensación de fatiga tanto física como mental. Su capacidad para acelerar la recuperación de la actividad parasimpática tras un esfuerzo físico permite al deportista una recuperación y regeneración más rápida, de forma que optimiza los ciclos de entrenamiento. Por otro lado, la espirulina muestra que podría mejorar la percepción subjetiva del rendimiento ya que reduce la tensión muscular.
- Entre los hechos más importantes, resalta el hallazgo de que las algas (especialmente *T. chuii*) podrían no actuar como antioxidantes directos, sino como moduladores transcripcionales, a través de la activación de la vía NRF2 induciendo la expresión de enzimas esenciales como la glutatión peroxidasa y la catalasa, de forma que se fortalecería la resiliencia celular ante el estrés oxidativo.
- Algunos compuestos como los fucoidanos y el paramilón podrían ser capaces de restaurar los niveles de lisozima y aumentar la secreción de IgA salival, acabando con el problema que genera el ejercicio de alta intensidad que suele comprometer la inmunidad del atleta.

En definitiva, existen muchas biomoléculas bioactivas marinas con un potencial biológico relevante según algunos resultados que parecen muy prometedores. Estas biomoléculas muestran indicios de mejora en el rendimiento y la recuperación deportiva, además de

otros aspectos como la salud inmunológica cuando se incluyen en la dieta de deportistas. Sin embargo, la evidencia deportiva existente sigue siendo insuficiente para demostrar firmemente el rigor de estas afirmaciones y poder realizarse recomendaciones dietéticas firmes debido a aspectos como el reducido número de muestras utilizadas en los estudios. Por todo esto, las algas presentan potencial para consolidarse como un suplemento más en la nutrición deportiva, aunque para ello se requiere de una solidez mayor en las evidencias.

## 6. Limitaciones del estudio y líneas futuras de investigación

### 6.1. Limitaciones del estudio

Aunque hay muchos resultados prometedores que ubican a las algas como posibles recursos biotecnológicos en la nutrición deportiva, siguen existiendo diferentes obstáculos que las algas deben enfrentar para conseguir evidencias totalmente validadas que puedan respaldar al cien por cien su uso como recomendaciones dietéticas en el mundo deportivo. Una de las limitaciones se encuentra en la amplia heterogeneidad de la composición bioquímica de las algas que varía desde la especie, la región geográfica, la profundidad del hábitat o incluso la estación de cosecha (1). Debido a esta inestabilidad es difícil replicar los datos obtenidos sobre el valor nutricional en estudios diferentes, de forma que estandarizar una dosis concreta es complicado.

A esta variabilidad biológica se suma el problema técnico basado en la cuantificación de nutrientes, y más concretamente en la fracción proteica. Esto se debe a que la fracción proteica se mide mediante la técnica del nitrógeno multiplicando el nitrógeno presente por 6,25 ya que todas las proteínas tienen un 16% mínimo de este elemento, y en el caso de las algas y la presencia en ellas de nitrógeno no proteico este dato podría variar y no ser del todo fiable (1).

Otro problema que hay que enfrentar es la bioaccesibilidad y el efecto de la matriz alimentaria, ya que la concentración analítica de un nutriente difiere en gran medida de la fracción que finalmente logra atravesar la barrera intestinal. Hay algunas algas como la microalga *Chlorella* que poseen paredes celulares muy rígidas que resultan indigeribles para el ser humano, de forma que gran parte del contenido proteico y lipídico es excretado y no aporta un beneficio

metabólico. Además, la absorción total de proteínas o quelantes de minerales esenciales puede ser inhibida por las altas concentraciones de fibra soluble y alginatos (1).

Por otro lado, no todos los individuos presentan la misma microbiota intestinal de manera que no todos presentan la competencia enzimática necesaria para fermentar los polisacáridos complejos de las algas. Se ha documentado que algunas poblaciones como la japonesa, con un consumo histórico mayor en algas, han adquirido genes de bacterias que les permiten digerir algunos compuestos que la población occidental trataría como fibra inerte. Esto dificulta la generalización de los resultados obtenidos en los estudios en regiones geográficas específicas (1).

Respecto a la metodología de los ensayos clínicos, han utilizado en su mayoría tamaños de muestra reducidos y duraciones de intervención cortas (de 2 a 8 semanas), lo que impide determinar los efectos del consumo crónico en el rendimiento atlético. Además, existe una dependencia excesiva de modelos *in vitro* en los que no se considera el metabolismo de primer paso ni las interacciones que ocurren en un organismo vivo.

Por último, la capacidad de las algas para absorber elementos del entorno marino como metales pesados como el plomo o el cadmio entre otros resulta en un problema de seguridad y toxicidad. Por tanto, aunque su potencial funcional es indiscutible, la consolidación de las algas como suplemento ergogénico requiere de análisis más rigurosos, procesos de cultivo controlados y ensayos clínicos específicos en deportistas de élite (1).

## 6.2. Líneas futuras de investigación

Las limitaciones anteriores conllevan la apertura de nuevas líneas de investigación futura en este campo:

- El diseño de nuevos ensayos clínicos controlados, aleatorizados y con doble ciego, en el que se utilicen muestras de mayor tamaño siendo el grupo representativo formado por deportistas y períodos de tiempo más prolongados, permitirá realizar una evaluación más eficiente del consumo crónico de algas sobre el rendimiento y la recuperación deportiva.
- Desarrollar procesos estandarizados para el desarrollo de suplementos formados por las distintas especies, para reducir la variabilidad presente entre éstas.
- Realizar un estudio con mayor profundidad en la biodisponibilidad, comparando las diferentes formas de procesado para así evaluar la fracción de nutrientes que llega a la circulación sistémica en humanos. Asimismo, investigar cómo afecta la microbiota intestinal a la suplementación con algas.

- Centrar los estudios en deportistas de élite de diferentes ámbitos deportivos y sexos validando las propiedades descritas en estudios anteriores en condiciones de entrenamiento competitivas.
- Realizar protocolos para controlar el consumo seguro de algas garantizando su calidad y seguridad de forma que se compruebe la ausencia de metales pesados.

Este conjunto de líneas futuras otorgará un mayor rigor a las algas como suplemento ergogénico con eficacia y seguridad, además de mostrar una justificación científica sólida para saber en qué condiciones se debe incluir en la dieta de un deportista.

## 7. Bibliografía

1. Wells M, Potin P, Craigie J, Raven J, Merchant S, Helliwell K, et al. Algae as nutritional and functional food sources: revisiting our understanding. *Journal of Applied Phycology*. 2017 Abril: p. 949-982.
2. Wu J, Tso R, Teo H, Haldar S. The utility of algae as sources of high value nutritional ingredients, particularly for alternative/complementary proteins to improve human health. *Frontiers in Nutrition*. 2023 Octubre: p. 1277343.
3. Lopes D, Melo T, Rey F, Meneses J, Monteiro F, Helguero L, et al. Valuing Bioactive Lipids from Green, Red and Brown Macroalgae from Aquaculture, to Foster Functionality and Biotechnological Applications. *Molecules*. 2020 Agosto: p. 3883.
4. Tuna T, Ersoy N. Future Protein Sources in Sports Nutrition: Sustainable Solutions. *Current Nutrition Reports*. 2026 Febrero: p. 12.
5. Guiry M, Guiry G. How many species of algae are there? *Journal of Phycology*. 2012 Octubre: p. 1057-1063.
6. Peñalver R LJRGPMPNG. Seaweeds as a Functional Ingredient for a Healthy Diet. *Marine Drugs*. 2020 Junio: p. 301.
7. Wen X PCZHLZLGCCea. Ulva (Enteromorpha) Polysaccharides and Oligosaccharides: A Potential Functional Food Source from Green-Tide-Forming Macroalgae. *Marine Drugs*. 2022 Marzo: p. 202.

8. Myers S, O'Connor J, Fitton J, Brooks L, Rolfe M, Connellan P, et al. Fucoïdan Supplementation Restores Fecal Lysozyme Concentrations in High-Performance Athletes: A Pilot Study. *Marine Drugs*. 2020 Agosto: p. 412.
9. Martínez-Olcina M, Vicente-Martínez M, Leyva-Vela B, González-Alvarado L, Asencio-Mas N, Rodríguez-López I, et al. Effects of Algae-Based Supplementation on Metabolic, Oxidative, and Inflammatory Markers in Physically Active Adults: A Pilot Randomized Controlled Trial. *Applied Sciences*. 2025 Junio: p. 6381.
10. Toro V, Siquier-Coll J, Bartolomé I, Robles-Gil M, Rodrigo J, Maynar-Mariño M. Effects of *Tetraselmis chuii* Microalgae Supplementation on Ergospirometric, Haematological and Biochemical Parameters in Amateur Soccer Players. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020 Septiembre: p. 6885.
11. La Mantia I, Maniaci A, Scibilia G, Scollo P. Effects of a Dietary Microalgae (*Arthrospira platensis*) Supplement on Stress, Well-Being, and Performance in Water Polo Players: A Clinical Case Series. *Nutrients*. 2024 Julio: p. 2421.
12. Fujie S, Inoue K, Tsuji K, Horii N, Oshiden M, Tabata I, et al. Chlorella-Induced Increase in Cardiac Function Further Enhances Aerobic Capacity Through High-Intensity Intermittent Training in Healthy Young Men and Rats. *Nutrients*. 2025 Agosto: p. 2657.
13. Serra A, Silva S, Pleno de Gouveia L, Alexandre A, Pereira C, Pereira A, et al. A Single Dose of Marine *Chlorella vulgaris* Increases Plasma Concentrations of Lutein,  $\beta$ -Carotene and Zeaxanthin in Healthy Male Volunteers. *Antioxidants*. 2021 Julio: p. 1164.
14. Zhang X, Shu M, Li K, Wang N, Wang X, Shao L, et al. Effects of 4-week astaxanthin supplementation on athletic performance and body composition in young male taekwondo athletes: a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Frontiers in Nutrition*. 2025 Diciembre: p. 1731899.
15. Nakashima A, Suzuki N, Asayama Y, Okada K, Kotani T, Adachi Y, et al. Effect of Food Containing Paramylon Derived from *Euglena gracilis* EOD-1 on Fatigue in Healthy Adults: A Randomized, Double-Blind, Placebo-Controlled, Parallel-Group Trial. *Nutrients*. 2020 Octubre: p. 3098.
16. Cocksedge S, Infante C, Torres S, Lama C, Mantecón L, Manchado M, et al. *Tetraselmis chuii* Supplementation Increases Skeletal Muscle NRF2 and Antioxidant Enzyme Gene

Expression, and Peak Oxygen Uptake in Healthy Adults: A Randomised Crossover Trial. Antioxidants. 2025 Abril: p. 435.

17. He Y, He Q, Tian H, al. e. Ulvan and Ulva oligosaccharides: a systematic review of structure, preparation, biological activities and applications. Bioresources and Bioprocessing. 2023 Mayo: p. 50.
18. Waldman H. Astaxanthin Supplementation as a Potential Strategy for Enhancing Mitochondrial Adaptations in the Endurance Athlete: An Invited Review. Nutrients. 2024 Noviembre: p. 1750.

