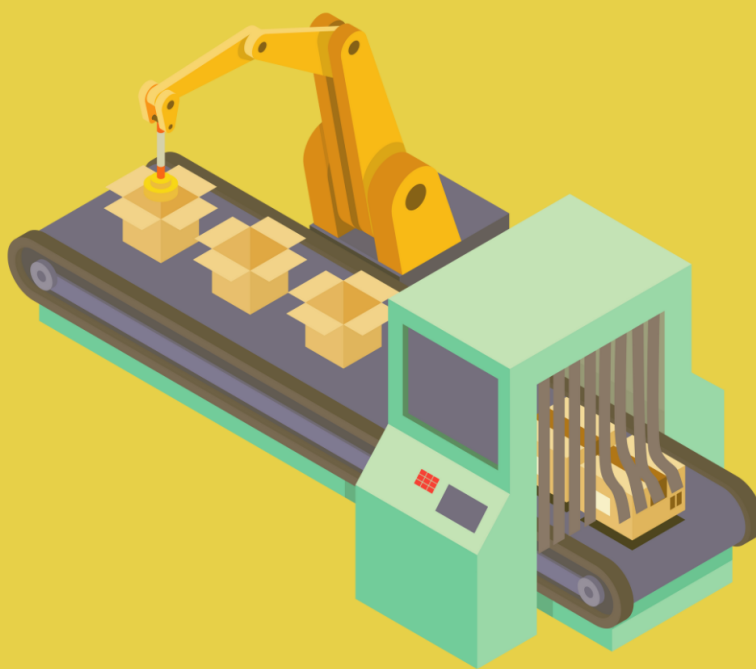


# INSTALACIONES Y EQUIPOS DE CRÍA Y CULTIVO

---



**TEMARIO OFICIAL ACTUALIZADO**

## **28. Valoración de la idoneidad del cultivo de microalgas en función de las distintas etapas de crecimiento. Nutrientes suministrados y nutrientes esenciales optimizados. Función de macronutrientes y de micronutrientes en el crecimiento algal.**

### **Introducción**

El cultivo de microalgas se ha consolidado como una alternativa biotecnológica de gran relevancia para sectores como la acuicultura, la agricultura sostenible, la producción de biofertilizantes, la obtención de biocombustibles o la generación de compuestos bioactivos de interés comercial. Su potencial productivo y su versatilidad como materia prima dependen en gran medida de la optimización de las condiciones de cultivo, entre las que destacan de forma especial la gestión de los nutrientes en función de las distintas etapas del crecimiento algal.

La valoración de la idoneidad del cultivo en cada fase —latencia, crecimiento exponencial, fase estacionaria y declive— es clave para establecer estrategias técnicas que permitan maximizar el rendimiento y mantener la estabilidad fisiológica de las poblaciones. Esta evaluación debe contemplar factores como la tasa de división celular, la densidad alcanzada, el consumo de nutrientes, y la relación entre condiciones ambientales y respuesta metabólica. Un suministro adecuado y equilibrado de macronutrientes y micronutrientes, ajustado a los requerimientos de cada especie y fase, es esencial para evitar carencias, acumulación de residuos o inhibición del crecimiento.

Los macronutrientes como el nitrógeno, el fósforo, el potasio, el magnesio, el azufre o el calcio cumplen funciones estructurales, energéticas y catalíticas fundamentales en los procesos de fotosíntesis, división celular y síntesis de biomoléculas. Por su parte, los micronutrientes —hierro, zinc, cobre, manganeso, molibdeno, boro, entre otros— intervienen como cofactores enzimáticos clave en rutas metabólicas específicas, y su presencia, aunque en concentraciones muy bajas, es determinante para el equilibrio fisiológico y la calidad de la biomasa producida.

En este contexto, la LOMLOE y la Ley Orgánica 3/2022 de Ordenación e Integración de la Formación Profesional refuerzan la importancia del desarrollo de las competencias del alumnado para mejorar su potencial de empleabilidad. La capacitación en la evaluación de etapas de crecimiento y la gestión de nutrientes esenciales en cultivos microalgales prepara a los futuros técnicos para intervenir en procesos productivos de alto valor tecnológico, sostenibles y alineados con los objetivos actuales de bioeconomía.

El análisis detallado de la idoneidad del cultivo según sus fases, junto con el estudio de los nutrientes suministrados y su papel en el desarrollo algal, permitirá comprender cómo intervenir

de forma técnica y fundamentada en la optimización del cultivo. En los siguientes apartados se desarrollarán los principales criterios de evaluación, la función específica de cada nutriente y su relación con el rendimiento y la estabilidad del sistema productivo.

## **Valoración de la idoneidad del cultivo de microalgas en función de las distintas etapas de crecimiento**

### **Etapas del crecimiento microalgal y sus implicaciones productivas**

El desarrollo de un cultivo de microalgas sigue una curva de crecimiento caracterizada por varias fases definidas: fase de latencia (o fase lag), fase logarítmica (exponencial), fase estacionaria y fase de declive. Cada una de estas etapas representa un estado fisiológico distinto de la población celular, con necesidades específicas en términos de nutrientes, luz, CO<sub>2</sub>, espacio y control de parámetros ambientales. La valoración de la idoneidad del cultivo en cada fase es fundamental para tomar decisiones sobre el momento óptimo de cosecha, la aplicación de fertilizantes, la renovación de medio o la transferencia a nuevos volúmenes.

- **Fase de latencia:**

Se produce tras la inoculación en un nuevo medio. Durante esta etapa, las microalgas adaptan su metabolismo al entorno, activan la expresión génica y restauran estructuras celulares. No hay crecimiento visible, pero es una fase crítica para el éxito del cultivo. Su duración depende de la calidad del inóculo, la temperatura, la disponibilidad de nutrientes y la iluminación inicial.

- **Fase logarítmica o exponencial:**

Es la etapa de mayor velocidad de crecimiento, en la que las células se dividen de forma continua y acelerada. Se considera la fase óptima para la multiplicación del cultivo y la obtención de biomasa de alta calidad. La fotosíntesis es máxima, y el consumo de macronutrientes como nitrógeno y fósforo se incrementa notablemente. En esta fase, la evaluación de parámetros como densidad óptica, tasa de crecimiento específica ( $\mu$ ) o concentración de clorofila permite determinar la salud y la productividad del sistema.

- **Fase estacionaria:**

Se alcanza cuando uno o más factores limitantes —como nutrientes, luz, espacio o acumulación de residuos— detienen el crecimiento exponencial. Aunque la densidad celular se mantiene estable, las tasas de división disminuyen y pueden aparecer señales de estrés. En sistemas semicontinuos, se busca mantener al cultivo lo más cerca posible de esta fase sin entrar en declive, renovando parte del medio y extrayendo biomasa para cosecha. La calidad de la biomasa puede variar dependiendo del tipo de metabolitos que se acumulen (por ejemplo, lípidos en situaciones de estrés por nitrógeno).

- **Fase de declive o senescencia:**

La población celular comienza a disminuir por agotamiento de nutrientes, exceso de densidad, acúmulo de toxinas o falta de renovación del medio. Aparecen células muertas o en proceso de lisis, y se reduce la actividad fotosintética. Esta etapa debe evitarse en producción, ya que implica pérdidas de calidad y viabilidad.

La idoneidad del cultivo se evalúa a partir de indicadores físicos, químicos y biológicos que permiten conocer en qué fase se encuentra el sistema y tomar decisiones estratégicas. Entre los parámetros más empleados destacan:

- **Densidad celular** (recuento en cámara de Neubauer o turbidimetría).
- **Absorbancia óptica (OD)** a 680–750 nm como indicador de concentración de biomasa.
- **Tasa de crecimiento específica ( $\mu$ )** y tiempo de duplicación.
- **Concentración de pigmentos** (clorofila-a, carotenoides, ficocianina).
- **pH y oxígeno disuelto**, que reflejan la actividad fotosintética y respiratoria.

El monitoreo de estos indicadores debe realizarse de forma continua o con frecuencia regular, especialmente en sistemas productivos de tipo semicontinuo o intensivo, donde pequeños cambios en la fase del cultivo pueden afectar significativamente al rendimiento global del sistema.

## **Criterios técnicos para la valoración de la fase del cultivo**

La determinación de la etapa de crecimiento no solo es útil para describir el estado fisiológico del cultivo, sino que tiene aplicaciones directas en la gestión técnica:

- **Cosecha:** en cultivos destinados a biomasa, la fase final de la etapa exponencial o el inicio de la fase estacionaria suelen ser los momentos óptimos para la recolección, ya que se maximiza la biomasa sin pérdida de calidad.
- **Reinoculación:** cuando se planea escalar el cultivo a mayor volumen, se recomienda hacerlo en plena fase logarítmica, cuando las células presentan alta actividad metabólica y rápida capacidad de adaptación.
- **Inducción de metabolitos específicos:** en algunas aplicaciones, se busca prolongar la fase estacionaria o inducir estrés nutricional controlado para favorecer la producción de compuestos como lípidos, polisacáridos o pigmentos antioxidantes.

La evaluación objetiva y continuada de la fase del cultivo permite una gestión más eficiente y rentable del sistema, adaptando las decisiones a las condiciones reales de producción. Esta valoración, además, sienta las bases para una correcta programación de la nutrición del cultivo, ajustando el suministro y concentración de nutrientes esenciales a cada momento del ciclo, aspecto que se abordará en el siguiente epígrafe.

## Nutrientes suministrados y nutrientes esenciales optimizados

### Composición del medio de cultivo: tipos y formulaciones

La calidad y equilibrio de los nutrientes suministrados al medio de cultivo son factores determinantes en la productividad y estabilidad de las microalgas. Estos organismos fotosintéticos requieren una serie de elementos químicos disueltos en el medio acuoso para realizar funciones metabólicas, estructurales y enzimáticas esenciales. La selección de una formulación adecuada de nutrientes debe tener en cuenta la especie microalgal, la etapa de crecimiento, el sistema de cultivo (abierto o cerrado) y el objetivo productivo (biomasa, lípidos, pigmentos, etc.).

Los medios más utilizados en producción microalgal son:

- **Medio Guillard (f/2):** diseñado para cultivos marinos, contiene nitrato, fosfato, silicato (opcional), vitaminas (B<sub>1</sub>, B<sub>12</sub>, biotina), y micronutrientes quelados. Es uno de los medios estándar en acuicultura larvaria.
- **Medio Conway y Walne:** ampliamente utilizados en hatcheries de moluscos, incluyen nutrientes similares al f/2, pero con variaciones en concentración de hierro y oligoelementos.
- **Medios para cultivos de agua dulce:** como el BG11 (para *Spirulina* o *Chlorella*), adaptados a especies no marinas y sin necesidad de aporte salino.

Las formulaciones se pueden suministrar en forma líquida, liofilizada o como concentrados que se diluyen en agua destilada o de mar estéril. En sistemas industriales, es habitual preparar soluciones madre que permiten dosificar nutrientes mediante bombas peristálticas o fertirrigación automatizada.

### Optimización del suministro de nutrientes: criterios y técnicas

Una nutrición eficaz implica no solo aportar los nutrientes necesarios, sino hacerlo en la proporción y momento adecuados. La **optimización del suministro** permite reducir costes,

evitar desequilibrios iónicos y maximizar la productividad celular. Para lograrlo, se aplican distintas estrategias técnicas:

- **Ajuste según etapa de crecimiento:** en la fase logarítmica se incrementan las dosis de nitrógeno y fósforo para sostener la división celular. En fases de maduración, puede reducirse el nitrógeno para inducir acumulación de lípidos o carotenoides en ciertas especies.
- **Monitoreo y ajuste dinámico:** el análisis periódico del medio (nitratos, fosfatos, pH, oxígeno disuelto) permite detectar carencias o excesos. Algunos sistemas incorporan sensores conectados a controladores automáticos que ajustan la dosificación en tiempo real.
- **Uso de bioestimulantes y cofactores:** en algunos casos, se añaden compuestos que mejoran la absorción de nutrientes o estimulan rutas metabólicas específicas, como ácidos húmicos, aminoácidos o extractos de algas superiores.
- **Sistemas de reposición parcial:** en cultivos semicontinuos, se retira una parte del volumen y se reemplaza con medio fresco enriquecido, lo que permite mantener una concentración estable de nutrientes sin interrumpir el crecimiento.
- **Modelado nutricional:** el uso de modelos matemáticos para predecir el consumo de nutrientes en función del crecimiento permite planificar las dosis óptimas y evitar sobrealimentación.

## Relación entre calidad del nutriente y rendimiento productivo

La fuente química del nutriente influye directamente en su **biodisponibilidad** y eficiencia de uso. Por ejemplo:

- El nitrógeno puede suministrarse como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) o urea, cada uno con distintos efectos sobre el pH del medio y el metabolismo algal.
- El fósforo se aporta comúnmente como fosfato monopotásico o dipotásico, cuya solubilidad y disponibilidad varía según el pH.
- Los oligoelementos como el hierro requieren quelatación (por ejemplo, con EDTA o EDDHA) para permanecer en solución y ser absorbidos eficientemente.

El uso de fuentes contaminadas o inestables puede provocar precipitaciones, desequilibrios iónicos o incluso toxicidad. Por ello, la calidad analítica de los compuestos utilizados debe estar garantizada, especialmente en sistemas cerrados o de uso en alimentación acuícola.

La trazabilidad de los nutrientes suministrados también es relevante en entornos profesionales, especialmente cuando la producción se destina a alimentos funcionales, suplementos nutricionales o ingredientes bioactivos. La correcta gestión documental del origen, fecha de aplicación y concentración de cada nutriente permite mantener un control exhaustivo del proceso.

Desde el punto de vista técnico-formativo, la capacidad para seleccionar, dosificar y ajustar nutrientes de manera eficiente constituye una competencia clave en la Formación Profesional asociada a la producción microalgal. Este conocimiento es también el punto de partida para entender en profundidad el papel que desempeñan los diferentes elementos —macronutrientes y micronutrientes— en los procesos fisiológicos de las microalgas, cuestión que se analizará a continuación.

## Función de macronutrientes y de micronutrientes en el crecimiento algal

### Función de los macronutrientes en el metabolismo de las microalgas

Los **macronutrientes** son elementos esenciales requeridos en grandes cantidades por las microalgas para mantener su metabolismo, estructura y reproducción celular. Su papel es fundamental durante todas las fases del crecimiento, aunque su demanda varía especialmente en función de la etapa fisiológica del cultivo y del objetivo productivo (biomasa, pigmentos, lípidos, etc.). Los principales macronutrientes incluyen nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S).

- **Nitrógeno (N):** componente clave de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos y pigmentos fotosintéticos como la clorofila. Su disponibilidad afecta directamente la tasa de división celular. Las carencias se traducen en clorosis, reducción del crecimiento y menor actividad fotosintética. Puede administrarse como nitrato, amonio o urea, siendo necesario ajustar su forma en función del pH del medio y la especie cultivada.
- **Fósforo (P):** participa en la formación de ATP, fosfolípidos de membrana y ácidos nucleicos. Es esencial en rutas de transferencia de energía y señalización celular. Su déficit puede ralentizar el crecimiento y reducir la producción de biomasa. A menudo actúa como nutriente limitante, especialmente en medios con bajo contenido orgánico.
- **Potasio (K):** interviene en la regulación osmótica, el transporte de nutrientes y la activación enzimática. Aunque no forma parte de compuestos estructurales, su papel en la homeostasis celular es determinante. Su presencia favorece la resistencia al estrés hídrico y térmico.
- **Magnesio (Mg):** núcleo central de la molécula de clorofila, esencial para la fotosíntesis. También actúa como cofactor de numerosas enzimas. La deficiencia de Mg se

manifiesta como clorosis internerval, especialmente en hojas viejas.

- **Azufre (S):** necesario para la síntesis de aminoácidos azufrados (metionina, cisteína) y de coenzimas como la coenzima A. Su presencia es indispensable para la integridad estructural de proteínas y para el metabolismo de antioxidantes.
- **Calcio (Ca):** implicado en la integridad de la pared celular, la división celular y la transducción de señales. Aunque requerido en menor cantidad que otros macronutrientes, su déficit puede provocar alteraciones en la morfología celular y la coagulación de la biomasa.

El equilibrio entre estos elementos es determinante para evitar antagonismos nutricionales y garantizar un desarrollo celular armonioso. Las carencias, excesos o desequilibrios provocan respuestas de estrés que, en algunos casos, pueden ser aprovechadas de forma controlada para inducir metabolitos de interés, como lípidos o carotenoides.

## Rol de los micronutrientes en los procesos fisiológicos algales

Los **micronutrientes** o elementos traza, aunque necesarios en muy bajas concentraciones, son imprescindibles para la actividad de numerosas enzimas y reacciones bioquímicas. Su ausencia o exceso puede afectar de forma severa la funcionalidad del metabolismo algal. Entre los más relevantes se encuentran:

- **Hierro (Fe):** cofactor esencial en enzimas relacionadas con la cadena de transporte electrónico y la síntesis de clorofila. Participa en la fotosíntesis, la respiración celular y la fijación de nitrógeno. En medios marinos, su disponibilidad está limitada, por lo que se administra en forma quelada (por ejemplo, Fe-EDTA).
- **Zinc (Zn):** regula la actividad de enzimas como la anhidrasa carbónica, implicada en la conversión de CO<sub>2</sub>. También influye en la síntesis de proteínas y ácidos nucleicos.
- **Cobre (Cu):** interviene en procesos de transferencia electrónica y enzimática. En exceso, puede resultar tóxico para muchas especies microalgales, por lo que debe controlarse cuidadosamente su concentración.
- **Manganeso (Mn):** esencial en la fotólisis del agua durante la fotosíntesis, y en enzimas antioxidantes como la superóxido dismutasa.
- **Molibdeno (Mo):** cofactor en la reducción del nitrato a amonio, fundamental en especies que asimilan nitrógeno inorgánico.
- **Boro (B):** contribuye a la integridad de la pared celular y a la estabilidad de los complejos ribonucleoproteicos. Aunque su función es menos comprendida que la de otros elementos, su presencia ha demostrado ser necesaria en diversos géneros de

microalgas.

- **Silicio (Si):** específico para algas diatomeas, interviene en la formación de sus frústulas silíceas. Su ausencia limita el crecimiento de estos organismos en cultivos destinados a acuicultura larvaria.

La biodisponibilidad de los micronutrientes está condicionada por el pH del medio, la interacción con otros elementos, la presencia de agentes quelantes y la concentración de sales. Por ello, su inclusión en el medio debe ser cuidadosamente dosificada y monitorizada a lo largo del cultivo.

En entornos productivos, tanto los macro como los micronutrientes se formulan en medios completos equilibrados, ajustados según especie, volumen y fase de cultivo. Su correcta gestión permite mantener cultivos estables, saludables y altamente productivos.

En el contexto formativo, la comprensión del papel de cada nutriente en el crecimiento microalgal permite al alumnado tomar decisiones técnicas fundamentadas y aplicar estrategias de corrección o mejora del rendimiento, reforzando competencias esenciales para su futura incorporación profesional. Esta visión integrada del proceso nutritivo y su impacto sobre la productividad nos conduce, finalmente, a valorar las implicaciones generales del manejo nutricional en el cultivo de microalgas.

## Conclusión

La gestión eficiente de los nutrientes en el cultivo de microalgas constituye un eje fundamental para garantizar la estabilidad fisiológica, el rendimiento productivo y la calidad de la biomasa generada. Comprender las distintas etapas de crecimiento del cultivo y evaluar su idoneidad en función de parámetros técnicos permite tomar decisiones estratégicas sobre el suministro de nutrientes, el momento de cosecha y la optimización del sistema de producción.

A lo largo del ciclo de vida de las microalgas, las demandas nutricionales varían de forma significativa. La fase logarítmica requiere un aporte constante y equilibrado de macronutrientes como el nitrógeno, fósforo y potasio, mientras que en etapas posteriores es posible inducir respuestas metabólicas específicas mediante ajustes controlados en la disponibilidad de determinados elementos. En paralelo, los micronutrientes, pese a su baja concentración, desempeñan funciones críticas en la fotosíntesis, la síntesis de proteínas, la división celular y la resistencia al estrés.

La capacidad para suministrar nutrientes esenciales de forma precisa, según especie, objetivo productivo y fase de cultivo, no solo permite maximizar la eficiencia del sistema, sino que también reduce el riesgo de carencias, toxicidades o desequilibrios que puedan afectar la viabilidad del proceso. La elección adecuada de las fuentes nutricionales, su formulación en

medios completos y la monitorización continua son prácticas imprescindibles para lograr una producción sostenible y competitiva.

Desde el ámbito de la Formación Profesional, este conocimiento dota al alumnado de una base técnica sólida para desempeñarse en entornos profesionales de producción microalgal, acuicultura, biofertilización o biotecnología ambiental. Además, permite desarrollar competencias clave como la interpretación de parámetros biológicos, la toma de decisiones técnicas fundamentadas y la capacidad de intervención ante desequilibrios nutricionales.

El tratamiento de estos contenidos puede enriquecerse mediante metodologías activas como el aprendizaje basado en problemas, la simulación de cultivos en laboratorio o el análisis de casos reales de optimización nutricional. Estas estrategias fomentan el aprendizaje significativo y la conexión entre teoría y práctica, reforzando así el desarrollo de las competencias del alumnado para mejorar su empleabilidad y su participación en sistemas productivos sostenibles e innovadores.

## **Bibliografía**

Ley Orgánica 3/2020, de 29 de diciembre, por la que se modifica la Ley Orgánica 2/2006, de 3 de mayo, de Educación. Boletín Oficial del Estado, núm. 340, 30 de diciembre de 2020.

Ley Orgánica 3/2022, de 31 de marzo, de ordenación e integración de la Formación Profesional

Polanco, E. (Dir.). (2000). La acuicultura: Biología, regulación, fomento, nuevas tendencias y estrategia comercial (Tomos I–II). Madrid: Fundación Alfonso Martín Escudero – Ed. Mundi-Prensa

Beaz Paleo, J. D. (2009). Ingeniería de la acuicultura marina: instalaciones en tierra. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) – Observatorio Español de Acuicultura

Beaz Paleo, J. D. (2010). Ingeniería de la acuicultura marina: instalaciones de peces en el mar. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) – Observatorio Español de Acuicultura

Beaz Paleo, J. D. (2011). Ingeniería de la acuicultura marina: cultivo de moluscos y crustáceos en el mar. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) – Observatorio Español de Acuicultura

Contreras Sánchez, W. M. (2022). Producción de alimento vivo en acuicultura. Villahermosa (México): Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Sorgeloos, P., Lavens, P., Léger, P., Tackaert, W., & Versichele, D. (1986). Manual para el cultivo y uso de Artemia en acuicultura. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)

Helm, M. M., Bourne, N., & Lovatelli, A. (2006). Cultivo de bivalvos en criadero: Un manual práctico. FAO Documento Técnico de Pesca No. 471. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)

Lekang, O.-I. (2013). Aquaculture Engineering (2nd ed.). Chichester, UK: Wiley-Blackwell

Lucas, J. S., Southgate, P. C., & Tucker, C. S. (Eds.). (2019). Aquaculture: Farming aquatic animals and plants (3rd ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell  
amazon.com

Castelló Orvay, F. (Ed.). (1993). Acuicultura marina: Fundamentos biológicos y tecnología de la producción. Barcelona: Publicacions de la Universitat de Barcelona