

Memoria final del proyecto ALGASAL⁺

Índice

1. Resumen.....	1
2. Introducción y antecedentes del proyecto.....	1
a. Contexto y justificación del proyecto.....	1
b. El proyecto ALGASAL ⁺	1
c. Antecedentes y capacidades del consorcio.....	2
3. Objetivos del proyecto.....	2
a. Objetivo principal.....	2
b. Objetivos específicos.....	3
c. Objetivos transversales.....	3
4. Descripción y desarrollo de las actividades.....	4
a. Actividad 0: Plan de comunicación.....	4
b. Actividad A1: Bioprospección y caracterización de la biodiversidad de algas asociadas al vertido de salmuera.....	12
Cianobacterias.....	16
Diatomeas.....	16
Otras microalgas.....	16
c. Actividad A2: Diseño, desarrollo y optimización del cultivo outdoor a escala piloto.....	28
d. Actividad A3: Valorización de la biomasa y calidad alimentaria.....	39
e. Actividad A4: Análisis del Ciclo de vida e impacto socioeconómico.....	47
f. Actividad A5: Comparativa de eficiencia de los sistemas de cultivo.....	49
g. Actividad A6: Plan de viabilidad y transferencia tecnológica.....	51
5. Conclusiones generales y valoración del proyecto.....	54

1. Resumen

El proyecto ALGASAL⁺ surge como una respuesta innovadora basada en los principios de la economía circular, proponiendo un modelo de instalación sinérgico que se integra en las plantas desaladoras para fomentar una acuicultura de algas sostenible y competitiva. Esta iniciativa utiliza la salmuera —un subproducto industrial— como medio de cultivo, aprovechando las infraestructuras de captación existentes para reducir costes operativos y actuar, simultáneamente, como un sistema de biorremediación que mejora la calidad del vertido antes de su devolución al medio marino.

A través de un exhaustivo trabajo de bioprospección y el uso de técnicas avanzadas como el ADN ambiental, el proyecto logró catalogar y aislar 37 clones de microorganismos adaptados a la hipersalinidad, destacando el potencial biotecnológico de macroalgas como *Ulva australis* y *Ulva compressa* y microalgas extremófilas como *Dunaliella salina*. Los ensayos realizados en plantas piloto de Gran Canaria y Almería permitieron validar estas tecnologías en entornos operativos reales, alcanzando un nivel de madurez TRL 8 mediante la optimización de variables críticas como el control de pH, la dosificación de nutrientes y la aclimatación gradual al estrés salino.

Desde el punto de vista nutricional, los resultados confirman que el cultivo en salmuera no solo es viable, sino que funciona como un estímulo metabólico que incrementa el valor de la biomasa. En especies como *Ulva australis*, se detectó un aumento significativo del contenido proteico, alcanzando niveles comparables a fuentes terrestres y consolidando a estas algas como ingredientes seguros y funcionales para la industria alimentaria. Finalmente, el análisis socioeconómico y de mercado concluye que, si bien la venta de biomasa en bruto tiene un valor limitado, la transición hacia modelos de biorrefinería integral para la extracción de compuestos de alto valor añadido representa una oportunidad estratégica para fortalecer la soberanía industrial y la sostenibilidad ambiental en Europa.

2. Introducción y antecedentes del proyecto

a. Contexto y justificación del proyecto

El sector de la biotecnología de algas experimenta actualmente un crecimiento exponencial a nivel global, consolidándose como una fuente estratégica de biomasa para sectores clave como la alimentación humana. España, y más específicamente las regiones del sur de la Península Ibérica y las Islas Canarias, poseen un potencial único en Europa para el desarrollo de la acuicultura vegetal terrestre. Esta ventaja competitiva se fundamenta en condiciones geoclimáticas excepcionales: una alta intensidad de radiación solar, un elevado número de horas de luz, limitadas precipitaciones y una vasta biodiversidad de algas nativas con alto potencial biotecnológico.

Sin embargo, el desarrollo industrial del sector enfrenta barreras críticas que comprometen su viabilidad. Entre los principales desafíos destacan los elevados costes económicos y ambientales derivados del consumo de recursos hídricos, energía y nutrientes, así como la complejidad en la gestión de efluentes. A esto se suman las severas trabas jurídico-administrativas para la obtención de permisos destinados a las infraestructuras de captación de agua de mar y gestión de vertidos. La combinación de estos factores dificultan la implantación de nuevas plantas de producción acuícola vegetal terrestre, ya que las exigencias de inversión y los tiempos de tramitación para crear infraestructuras hidráulicas desde cero suelen ser inasumibles para los promotores.

El proyecto ALGASAL⁺ aborda esta problemática proponiendo un modelo de instalación sinérgico que se integra directamente en las plantas desaladoras ya operativas, aprovechando sus sistemas de captación y vertido para hacer viable la expansión del sector.

b. El proyecto ALGASAL⁺

En este escenario, el proyecto ALGASAL⁺ surge como una respuesta innovadora basada en los principios de la economía circular. La propuesta se centra en el cultivo sostenible y competitivo de algas nativas mediante el acople estratégico con la industria de la desalación. Al utilizar la salmuera (un subproducto de la desalinización) como medio de cultivo y aprovechar las infraestructuras de captación ya existentes, el proyecto busca no solo reducir la huella ambiental y los costes operativos, sino también actuar como un sistema de biorremediación que mejore la calidad del vertido final antes de su devolución al medio marino.

c. Antecedentes y capacidades del consorcio

El éxito de esta iniciativa se sustenta en una sólida base de investigación previa liderada por el Instituto Tecnológico de Canarias (ITC). En fases preliminares, el ITC ha llevado a cabo bioprospecciones exhaustivas que han permitido identificar y aislar cepas nativas de microalgas como *Tetraselmis striata*, *Navicula salinicola*, *Dunaliella salina* y *Dunaliella tertiolecta*, así como macroalgas del género *Ulva* sp., todas ellas ya adaptadas de forma natural a condiciones de hipersalinidad.

Para la ejecución de este proyecto, se ha constituido una agrupación multidisciplinar que combina la excelencia investigadora y la experiencia industrial, integrada por:

- Instituto Tecnológico de Canarias (ITC): Coordinador y especialista en biotecnología azul y gestión del agua.
- Universidad de Almería (UAL): Expertos en tratamiento de aguas y producción de algas a escala preindustrial.

- Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) - Banco Español de Algas (BEA): Referente nacional en la conservación y caracterización de cepas de algas.

Además el proyecto ha contado con varias empresas colaboradoras que han participado y apoyado el proyecto:

- PORTO-MUIÑOS S.L.: Empresa líder en el sector de las macroalgas para la industria alimentaria, encargada de validar la calidad y viabilidad comercial del producto final.
- Mediterranean Algae Technologies S.L.: es una startup que cultiva macroalgas y obtiene compuestos bioactivos usados en cosmética, alimentación y que desarrolla soluciones sostenibles como la biorremediación de aguas.

3. Objetivos del proyecto

a. Objetivo principal

El objetivo general del proyecto ALGASAL⁺ es impulsar una acuicultura sostenible, competitiva y circular de algas nativas mediante el aprovechamiento de la salmuera procedente de plantas desaladoras. Con ello se busca mejorar la eficiencia en el uso de recursos (agua, energía y nutrientes), reducir el impacto ambiental de los vertidos industriales en el medio marino a través de la biorremediación y valorizar la biomasa obtenida para su aplicación en la industria alimentaria y otros sectores biotecnológicos.

b. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, el proyecto se articula en torno a las siguientes metas técnicas y científicas:

- Difundir el conocimiento sobre el capital biológico de las algas locales con capacidades de adaptación a condiciones de hipersalinidad en regiones con limitados recursos hídricos
- Mejorar el conocimiento científico-técnico sobre el cultivo de algas en condiciones hipersalinas
- Mejorar el conocimiento sobre acuicultura sostenible con microalgas y macroalgas nativas aprovechando los vertidos de salmuera procedentes de desaladoras
- Aprovechamiento y valorización del residuo de salmuera procedente de plantas desaladoras
- Fomento del sector de la biotecnología azul en comunidades con menor desarrollo económico
- Generación de transferencia tecnológica y mejora del conocimiento en materia de acuicultura sostenible en comunidades con menor desarrollo económico

- Valorización de la biomasa final en la industria alimentaria contribuyendo a la seguridad alimentaria en la Unión Europea

c. Objetivos transversales

Más allá de los hitos tecnológicos, el proyecto ALGASAL⁺ se fundamenta en un compromiso firme con la sostenibilidad integral y la responsabilidad social, alineándose con las directrices estratégicas de la Unión Europea para una acuicultura más sostenible y competitiva. En este sentido, el proyecto persigue una serie de objetivos transversales diseñados para maximizar el impacto positivo de la investigación en el entorno natural y en la estructura social de las relaciones de actuación:

- Impulso a la economía circular: Transformar la salmuera, tradicionalmente gestionada como un residuo industrial, en un recurso productivo para la generación de biomasa de alto valor.
- Garantía de igualdad de género: Asegurar la participación representativa de mujeres en todas las fases del proyecto y promover una comunicación inclusiva, aplicando de forma efectiva el Plan de Igualdad de las entidades participantes y las directrices del Gobierno de Canarias.
- Fomento de la inclusión social: Implementar medidas que favorezcan la participación de colectivos desfavorecidos, garantizando la accesibilidad universal a los resultados y promoviendo la reconversión laboral de trabajadores del sector pesquero hacia la biotecnología azul.
- Biorremediación y protección del medio marino: Cuantificar y demostrar la capacidad de los cultivos de algas para actuar como biofiltros, mejorando la calidad del agua de rechazo antes de su devolución al medio natural.
- Transparencia y transferencia del conocimiento: Facilitar el acceso público a los hallazgos científicos mediante la elaboración de manuales técnicas y el volcado de datos en inventarios oficiales de biodiversidad como el Inventario Español del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad (IEPNB), el Banco de Datos de la Naturaleza (BDN) y el Bando de Datos de Biodiversidad de Canarias (BIOTA).

4. Descripción y desarrollo de las actividades

El plan de ejecución del proyecto ALGASAL⁺ se ha estructurado en siete áreas de actuación interconectadas, diseñadas para validar técnica y económicamente el cultivo de algas en entornos de hipersalinidad. La metodología propuesta sigue un flujo lógico que comienza con

la identificación del capital biológico en el medio natural, continúa con la validación de prototipos en entornos reales (alcanzando un nivel de madurez tecnológica TRL 8) y culmina con el análisis de viabilidad comercial y la transferencia del conocimiento al sector industrial.

Este enfoque permite abordar de manera integral los retos de la economía circular, transformando un subproducto industrial en una materia prima de alto valor para la industria alimentaria. Las actividades se desarrollan de forma paralela en las regiones de Canarias y Almería, permitiendo una comparativa científica de resultados en zonas con condiciones ambientales similares pero desafíos hídricos específicos.

a. Actividad 0: Plan de comunicación.

Para dar a conocer el proyecto no sólo a la comunidad científica hemos contado con un extenso y potente plan de comunicación, ya que entendemos que, a día de hoy, divulgación y ciencia deben ir de la mano. Esta actividad se desarrolla desde el principio hasta el final del proyecto en ambos territorios a través de distintas actividades y actos de carácter presencial, así como en la web y digitalmente.

- Kick-off meeting: realización de una jornada inicial en la sede del ITC en Pozo Izquierdo (Gran Canaria), para difundir el proyecto y convocar a las distintas entidades para ejecutar su planificación.
- Identidad visual: Diseño de un logotipo representativo que refleje de forma visual la esencia de ALGASAL⁺.
- Estrategia en redes sociales: Difusión constante a través de un instagram creado para el proyecto (@algasalplus) así como de perfiles de las entidades en redes sociales como Instagram, X, Facebook y LinkedIn, para maximizar el alcance del conocimiento generado.
- Material divulgativo y educativo: Elaboración de una infografía de carácter divulgativo para explicar el proyecto, de cromos con biodiversidad de las algas encontradas en ambientes hipersalinos en ambas comunidades, de un cómic, de una infografía de carácter científico técnico sobre ecología y la importancia de las algas. Además, creación de merchandising sostenible con materiales reciclados con los personajes más emblemáticos del material divulgativo.
- Píldoras informativas: producción y difusión de pequeñas videoentrevistas de los profesionales que participan en el proyecto para acercar ALGASAL⁺ a todas las personas.
- Divulgación en colegios y participación en eventos: participación en jornadas divulgativas, en la Semana de la Ciencia, en el Día Internacional de la Mujer y la Niña en la Ciencia, en la Noche Europea de los Investigadores, asistencia a colegios e institutos

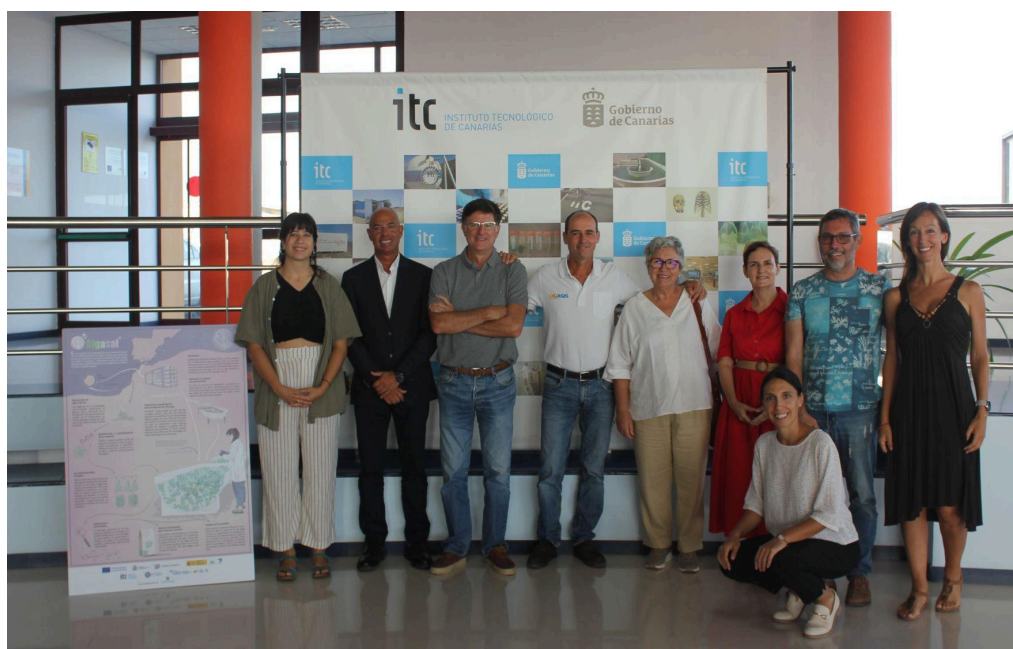
a difundir el proyecto así como también recepción de coles e institutos a las instalaciones de las distintas entidades.

- Vídeo final: Producción de un vídeo subtulado que resume y destaca lo que se ha hecho en el proyecto con una visión innovadora.
- Transferencia técnica: Participación y organización de jornadas científicas con ponentes relevantes, mesas redondas, entrevistas de radio, y jornadas técnicas en las instalaciones de las entidades.
- Jornada final: realización de una jornada final en Cádiz con otros dos proyectos de la Convocatoria Pleamar 2023 de la misma temática para exponer los resultados y hablar sobre los hitos tecnológicos conseguidos.
- Transferencia tecnológica: participación en congresos, creación de manuales técnicos, informes, artículos para revistas indexadas y otros materiales de carácter científico técnico sobre el proyecto de carácter público. Transferencia tecnológica del conocimiento con varias empresas de nuestro país del sector de la biotecnología azul. Elaboración de materiales técnicos que permitan a empresas de los sectores acuícola y de desalación adoptar este modelo sinérgico de producción.

A continuación se describen las acciones realizadas en esta actividad:

A0.1 Celebración de jornada kick-off meeting (rueda de prensa y difusión en medios y redes sociales)

Esta acción marcó el inicio oficial del proyecto, diseñada para presentar los objetivos estratégicos a los medios y coordinar el arranque operativo entre todos los socios del consorcio. Bajo esta premisa, el evento se llevó a cabo el 18 de septiembre de 2024 en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Canarias (ITC) en Pozo Izquierdo, Gran Canaria. La jornada reunió a los representantes de las tres entidades principales —el ITC como coordinador, la Universidad de Almería (UAL) y la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) a través del Banco Español de Algas (BEA)— junto a la empresa colaboradora Porto Muiños S.L.. Durante el encuentro se organizó una rueda de prensa formal que permitió dar a conocer el proyecto a la sociedad, logrando una difusión inicial efectiva en medios de comunicación y plataformas digitales.



A0.2 Creación de un logotipo para el proyecto

La identidad visual es fundamental para garantizar que todas las comunicaciones del proyecto sean reconocibles y mantengan una coherencia estética profesional. Por este motivo, al inicio de la andadura del proyecto se diseñó una imagen de marca exclusiva que representa fielmente la esencia de ALGASAL⁺ y su vinculación con el cultivo de algas. El logotipo se desarrolló en diversos formatos y gamas cromáticas para asegurar su correcta aplicación en todo tipo de soportes, desde papelería técnica hasta presentaciones y materiales digitales. Esta identidad visual ha sido el eje central de todos los eventos de comunicación y ha estado presente en las redes sociales y en la cartelería obligatoria instalada en las sedes de los socios.



A0.3 Organización y/o participación de/en una jornada divulgativa y científico-técnica

Esta acción buscó el intercambio de conocimientos tanto con la comunidad científica como con el sector educativo, promoviendo la cultura científica y la biotecnología azul a través de un intenso calendario de actividades. Entre estas destacaron la participación en:

- **La Semana de la Ciencia de 2024 y 2025:** en la UAL, estas jornadas permitieron que 158 alumnos de bachillerato de centros como el IES Al-Ándalus o el IES Alhamilla realizaran prácticas de laboratorio, mientras que el ITC y el BEA organizaron sesiones de puertas abiertas para profesionales de centros de I+D y empresas del sector.
- **Talleres de biotecnología:** En mayo de 2025, el BEA acogió el 2º Taller de Innovación en Biotecnología Azul, con sesiones de *networking* para buscar sinergias entre proyectos afines.
- **Visitas de centros educativos:** A lo largo del proyecto se recibieron estudiantes del IES Pérez Galdós (abril 2025), del Diploma de Estudios Científicos y Tecnológicos de la ULPGC (mayo 2025), el CIFP Felo Monzón (abril 2025), el grado en Biotecnología de la UAL (noviembre 2025) y el IES Jinámar con estudiantes de intercambio ERASMUS de Alemania (enero 2026). Además, el ITC visitó colegios rurales como el CEIP Temisas y el CEIP El Matorral en enero de 2026.
- **Mesa redonda final:** como hito de cierre, el proyecto organizó una mesa redonda final el 15 de enero de 2026 en Cádiz, titulada "Modelos de acuicultura con especies de bajo nivel trófico", que contó con ponentes del CSIC-IEO, IFAPA, la empresa Mediterranean Algae y ASEMA, logrando conectar a 34 asistentes presenciales y 127 participantes vía *streaming* a través de Youtube.

A0.4 Elaboración y difusión de material informativo y divulgativo

La creación de soportes físicos y digitales permite que los resultados del proyecto perduren en el tiempo y sean accesibles para públicos de diferentes edades y niveles de formación. Para cumplir con este objetivo, el consorcio produjo una amplia gama de materiales:

- **Infografías:** se diseñó una primera infografía de carácter general sobre los objetivos y una segunda de nivel científico-técnico que detalla las propiedades de las algas en la industria alimentaria e identificación genética.
- **Cómic y cromos:** se editó el cómic "¿Tan solo un alga?" para el público infantil y una colección de cromos con ilustraciones científicas de las especies de micro y macroalgas identificadas en Canarias y Andalucía.
- **Merchandising sostenible:** se produjo material con materiales reciclados y orgánicos, incluyendo bolsas de tela de algodón, bolígrafos de fibra de caña de trigo y libretas de cartón reciclado, de los cuales se repartieron más de 100 unidades en eventos finales.



A0.5 Organización y participación en actos públicos

El objetivo de esta acción fue sacar la ciencia del laboratorio y llevarla a espacios públicos masivos para concienciar sobre la importancia de la economía circular y la sostenibilidad. En este sentido, el proyecto tuvo una presencia destacada en:

- **Noche europea de los investigadores (2024 y 2025):** donde la UAL exhibió un reactor con cultivo vivo de *Ulva* sp. en el centro de Almería y el ITC participó con monólogos científicos y stands en la "Macaronight" del Museo Elder en Las Palmas de Gran Canaria.
- **Entrevistas de radio:** la labor de difusión fue especialmente intensa en medios de comunicación, incluyendo entrevistas en Radio Nacional de España (RNE) en el programa "Españoles en la Mar", en la Cadena SER ("Hoy por hoy Tajaraste" y "Hoy por hoy El drago"), Onda Cartagena y Radio Canaria ("Al otro lado del espejo", "La Alpisa" y "Roscas y Cotufas"), además de reportajes televisivos en los servicios informativos de la RTVC y una intervención en el servicio SerULPGC en la categoría de investigación.

- **Foros especializados:** se realizó una conferencia en la Real Sociedad Económica de Amigos del País de Gran Canaria, donde se analizó el papel de las algas para el desarrollo de soluciones sostenibles en el escenario global y macaronésico, presentando a ALGASAL⁺ como un proyecto clave en el sector emergente de Canarias. También se participó con stands y ponencias en la II Feria Regional de Economía Circular de Canarias y en el foro internacional I3-4 SEAWEED en octubre de 2025.
- **Charlas "Mujer y Niña en la Ciencia":** en el ámbito del fomento de vocaciones, la UAL impartió seis charlas en centros como el IES Celia Viñas y el IES San Isidro con motivo del Día de la Mujer y la Niña en la Ciencia, alcanzando a cientos de estudiantes de primaria y secundaria.
- **Difusión en Educación Infantil:** a mediados de febrero de 2026 se desarrolló una jornada divulgativa en el CEIP Los Geranios dirigida a 74 estudiantes de Educación Infantil. En estas sesiones, se introdujeron conceptos de biotecnología de forma sensorial y lúdica mediante la experimentación con muestras de biomasa, talleres creativos tras la lectura del cómic y juegos didácticos con cromos, utilizando para ello pigmentos derivados de algas y repartiendo unidades de *merchandising* oficial entre los pequeños grupos de trabajo.

A0.6 Estrategia de difusión en redes sociales

La comunicación digital permite una interacción directa con la ciudadanía y una actualización constante de los hitos del proyecto en tiempo real. La pieza central de esta estrategia fue la creación de la cuenta de Instagram @algasalplus, plataforma donde se difundieron los avances del proyecto, noticias relacionadas y se realizó un sorteo de material promocional. Como elemento innovador, se grabaron trece píldoras informativas en formato de video-entrevista donde los profesionales del equipo relataban de forma personal su experiencia e involucración en el trabajo diario. De forma paralela, el ITC, el BEA y la UAL compartieron activamente estas publicaciones en sus propios canales institucionales y páginas web, asegurando una difusión amplia y coherente con las normas de publicidad de los fondos europeos.

A0.7 Elaboración de un vídeo subtítulo sobre el proyecto y sus resultados

El material audiovisual resume visualmente los logros del proyecto, permitiendo una comprensión rápida de los procesos de cultivo y experimentación mediante un lenguaje cercano y accesible. En colaboración con la organización Océano Alfa, se llevó a cabo el rodaje y la edición de un vídeo profesional subtítulo que documenta las actividades realizadas en las tres sedes del consorcio. El equipo de rodaje se desplazó a las instalaciones para captar tomas *in situ* de los sistemas de cultivo e integrarlas con material audiovisual recopilado por las entidades en un espacio colaborativo en la nube. El resultado final es una pieza didáctica que explica la metodología empleada y los resultados obtenidos, facilitando su consulta en eventos públicos y plataformas digitales.

A0.8 Redacción y edición de una memoria a la finalización del proyecto

Este es el documento institucional de cierre que certifica el cumplimiento de todos los objetivos técnicos y administrativos establecidos inicialmente, consolidando el conocimiento generado durante la ejecución. Tras finalizar los 19 meses de trabajo, se procedió a la redacción y edición de esta memoria detallada que recopila de manera general todas las actuaciones llevadas a cabo. El documento sirve como un registro exhaustivo de la labor realizada, desde la fase de bioprospección inicial hasta los ensayos de escalado y valorización alimentaria, permitiendo una evaluación completa del impacto del proyecto y el cumplimiento de los indicadores previstos.

A0.9 Redacción y publicación de un manual sobre las técnicas de cultivo de algas en salmuera

Este manual actúa como una guía práctica para que otras entidades o empresas puedan replicar los modelos de cultivo desarrollados en ALGASAL⁺, fomentando la sostenibilidad en el sector acuícola. Se ha elaborado y publicado un manual técnico que recopila los protocolos específicos y las técnicas de cultivo para microalgas y macroalgas en condiciones de hipersalinidad. El contenido de esta publicación se basa directamente en la experiencia práctica y la experimentación realizada durante el proyecto con las diversas especies seleccionadas. El objetivo final de este material es facilitar la transferencia de conocimiento técnico y servir como referencia para futuros desarrollos en el ámbito de la biotecnología azul.

A0.10 Redacción de artículos científicos y participación en congresos científicos

La validación de los resultados por pares científicos es esencial para dar rigor académico a las innovaciones obtenidas y asegurar que el avance técnico sea reconocido formalmente por la comunidad investigadora. Bajo esta premisa, el equipo de investigación ha completado la redacción de dos artículos científicos: el primero versa sobre la biodiversidad de especies de algas nativas identificadas durante los muestreos llevados a cabo durante el proyecto en Canarias y Andalucía, y el segundo se centra en el Análisis del Ciclo de Vida (LCA) del proceso de cultivo en salmuera. Actualmente, ambos manuscritos se encuentran en una fase final de revisión interna por parte de los investigadores principales de las tres instituciones antes de su envío definitivo a revistas de alto impacto. Complementando esta labor editorial, el proyecto tuvo presencia internacional mediante la presentación de un póster técnico en el congreso Young Algaeneers Symposium (YAS), celebrado en Almería en junio de 2025, donde se compartieron los hallazgos preliminares con jóvenes investigadores de todo el mundo.

A0.11 Celebración de una jornada final para la presentación de resultados (rueda de prensa y difusión en medios y redes sociales)

Como cierre de las actividades técnicas y de coordinación, se organizó un evento de clausura diseñado para presentar los avances del proyecto a las empresas, instituciones y profesionales del sector acuícola. Esta jornada final de ALGASAL⁺ se llevó a cabo el 15 de enero de 2026 en las instalaciones de CTAQUA (Cádiz), en un formato de colaboración sinérgica junto a los proyectos AQUATROFIC y CAMBIA. El evento, de carácter híbrido, permitió la asistencia presencial de representantes de la Fundación Biodiversidad y los equipos técnicos del consorcio, mientras que la retransmisión íntegra por Youtube facilitó el acceso a más de 120 interesados. Durante la sesión, se expusieron de forma detallada las metodologías de cultivo empleadas, los resultados de la valorización alimentaria del producto final y se debatieron, en una mesa redonda técnica, los retos futuros para la implementación de la biotecnología de algas en entornos industriales.

A0.12 Programa de difusión de los resultados (know-how) para su transferencia tecnológica

La transferencia de tecnología asegura que el conocimiento generado no se quede en el ámbito académico, sino que llegue al mercado para generar valor económico y ambiental real. Para ello, se implementó un programa activo de comunicación orientado a la transferencia del *know-how* generado mediante interacciones directas con usuarios finales y agentes industriales. Este esfuerzo estratégico cristalizó en la formalización de tres documentos de colaboración con las empresas Porto-Muiños S.L., Macrocarbon S.L. y Biorizon Biotech S.L., consolidando así el vínculo entre la investigación pública y el sector empresarial de la biotecnología azul.

b. Actividad A1: Bioprospección y caracterización de la biodiversidad de algas asociadas al vertido de salmuera.

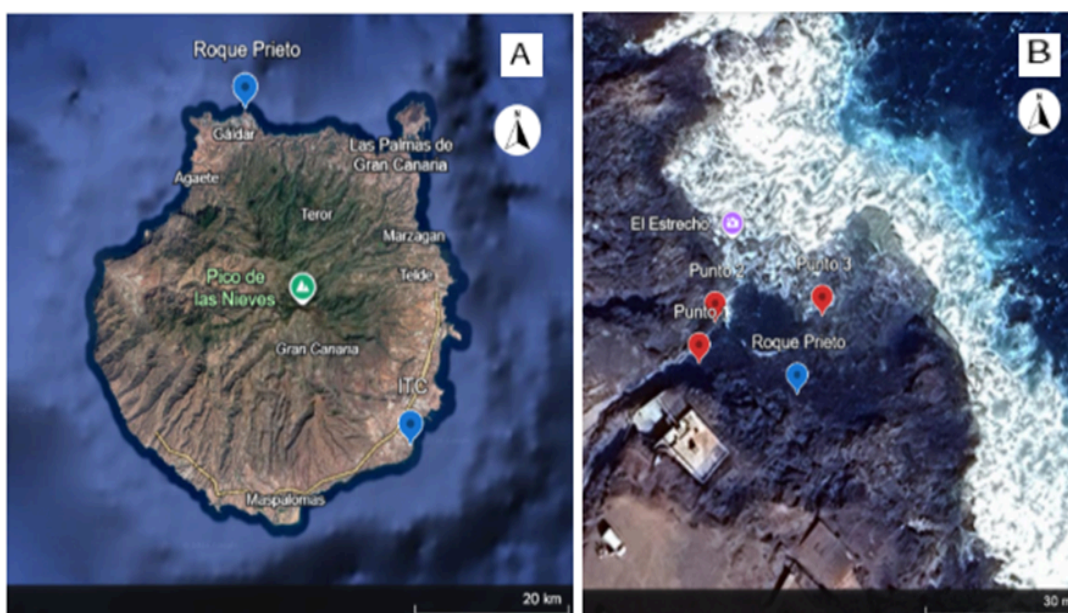
Esta actividad establece la base biológica del proyecto mediante el estudio de las especies cultivables y nativas asociadas a entornos hipersalinos de ambas regiones.

- Bioprospección de la biodiversidad: Identificación de cepas de microalgas y macroalgas adaptadas a entornos de hipersalinidad en Gran Canaria y Andalucía.
- Aislamiento, identificación y conservación: Selección de cepas con alto potencial biotecnológico para su mantenimiento en la colección oficial del BEA.
- Validación interna: Caracterización fisiológica y pruebas de aptitud biotecnológica en sistemas de cultivo a escala laboratorio bajo condiciones controladas.

A continuación se describen las acciones realizadas en esta actividad:

A1.1. Bioprospección, aislamiento, caracterización mediante técnicas moleculares y conservación de la biodiversidad de microalgas del vertido de salmuera

La ejecución de esta acción se basó en cuatro campañas de muestreo, una por cada estación del año, operando simultáneamente en las regiones de Canarias y Andalucía para capturar la biodiversidad de cianobacterias y microalgas cultivables asociada a vertidos de salmuera. En Gran Canaria, los trabajos se concentraron en el emisario de la planta desaladora de Roque Prieto (Gáldar), con especial atención al punto 1 debido a su proximidad al vertido directo, y en las canalizaciones industriales del ITC en Pozo Izquierdo.



Localización geográfica de las zonas de muestreo en (A) Gran Canaria y (B) puntos de muestreo en el entorno del emisario de la planta desaladora de Roque Prieto (Gáldar, Gran Canaria).

Durante las cuatro campañas de bioprospección previstas, se recolectaron muestras en la zona de influencia del emisario de Roque Prieto durante todas las estaciones del año. No obstante, el laborioso proceso de aislamiento e identificación de la biodiversidad cultivable de cianobacterias y microalgas se realizó exclusivamente con las muestras de noviembre y marzo, ya que el elevado volumen de clones obtenidos y los meses de trabajo necesarios para estabilizarlos hacían inviable repetir este procedimiento en cada estación. Para garantizar una comparativa estacional rigurosa de la biodiversidad en una zona con alta renovación hídrica, se priorizó el análisis de ADN ambiental (ADNa) a partir de muestras de agua y sustratos de fijación. Esta técnica permite estimar con precisión la dinámica y los cambios de la comunidad biológica a lo largo de todo el año sin requerir una presencia física constante, sirviendo como herramienta fundamental para evaluar la resiliencia de la biodiversidad frente a las condiciones de hipersalinidad del proyecto.

En Andalucía, ante la imposibilidad de establecer un punto fijo de muestreo, se optó por una estrategia itinerante en la Salina de San Rafael y en los sistemas experimentales del IFAPA La Cañada.



Localización geográfica del punto de muestreo en la salina abandonada de San Rafael (Roquetas de Mar, Almería).

La estrategia de recolección de biodiversidad fue exhaustiva y se adaptó a las particularidades de cada entorno, combinando métodos directos (toma de agua) e indirectos (raspado de sustrato para la obtención de microfitobentos y estrujado de macroalgas para liberar comunidades epífitas) para maximizar la obtención de cepas.

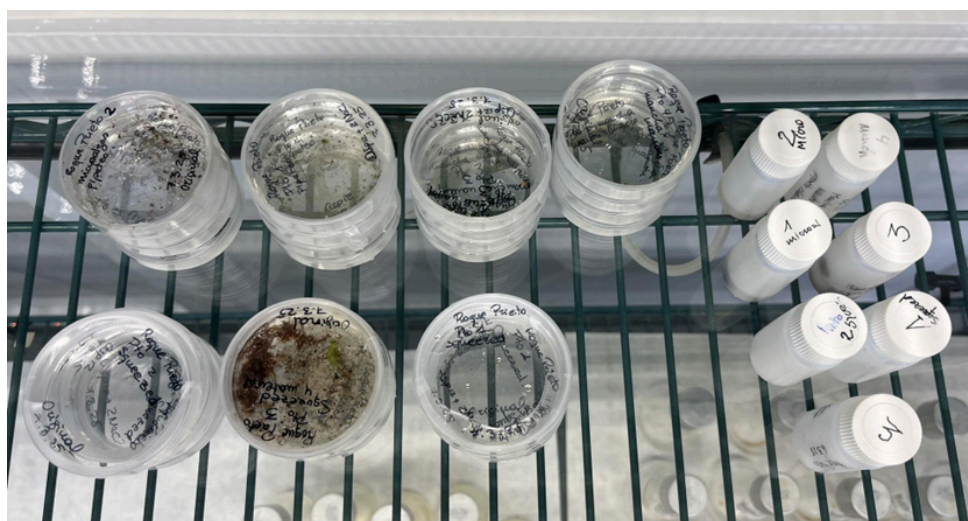


Imágenes tomadas durante la recolección de muestras en Roque Prieto (Gáldar).

Todas las muestras se mantuvieron en condiciones de baja intensidad lumínica y temperatura controlada durante su transporte al BEA para evitar la degradación del material biológico. Una vez en el laboratorio, tanto las muestras del medio natural como los filtros resultantes del filtrado mecánico, se inocularon en placas de Petri con distintos medios de cultivo.

Proceso de aislamiento, estabilización e identificación

Una vez en el laboratorio, las muestras fueron sometidas a una fase de enriquecimiento para activar las células. Para la obtención de cultivos monoclonales se emplearon técnicas de alta precisión: la micromanipulación (uso de microcapilares bajo microscopio) y la citometría de flujo para capturar poblaciones específicas basadas en su tamaño, forma o señales de fluorescencia natural.



Enriquecimiento de las muestras de campo una vez en las instalaciones del Banco Español de Algas.

El proceso de estabilización fue especialmente exigente, requiriendo un mínimo de 4 meses para asegurar que las cepas mantuvieran una división celular constante y viabilidad para futuros ensayos. La identificación definitiva se realizó mediante un flujo de trabajo molecular que incluyó la extracción de ADN con protocolo CTAB modificado (Hossen *et al.*, 2024) y la secuenciación Sanger de marcadores genéticos universales (16S, 18S, ITS y rcbL) en la empresa Macrogen S.L.

Tal y como se mencionó anteriormente, como complemento innovador a la bioprospección y aislamiento físico, se implementó la técnica de metabarcoding de ADN ambiental (ADNa). Esta metodología es clave para obtener una huella genética completa del ecosistema microbiano fotosintético, incluyendo aquellas especies que no son cultivables o son difíciles de aislar bajo condiciones estándar de laboratorio.

Dada la alta renovación hídrica y el estrés salino en los puntos de vertido de Roque Prieto, esta estrategia permite realizar una comparativa de biodiversidad robusta a lo largo del año. El ADNa detecta la presencia de taxones en estadios de latencia o en densidad tan bajas que pasarían desapercibidos en los muestreos directos. Al igual que en la A1.2., este análisis masivo se focalizó estratégicamente en el área de máxima influencia del vertido en Roque Prieto, el punto 1, por ser el mejor indicador de la dinámica y resiliencia de la comunidad microalgal frente a la hipersalinidad.

En este caso, se empleó una estrategia de metabarcoding mediante la amplificación de las regiones génicas conservadas 16S (para procariotas/cianobacterias) y 18S (V4 y V9, para eucariotas/microalgas), y posteriormente las muestras fueron procesadas mediante tecnología Next-Generation Sequencing (NGS) por la empresa Novogene S.L., lo que permite una secuenciación masiva en paralelo de millones de fragmentos de ADN simultáneamente. Además, para procesar el volumen masivo de datos generados por la NGS, las secuencias obtenidas se agrupan en Unidades Taxonómicas Operacionales (OTUs), lo que permite agrupar individuos con una similitud genética superior al 97%, es decir, representan a una entidad taxonómica distinta (equivalente a una especie o género).

El análisis bioinformático y la construcción de la filogenia molecular fueron los pilares para la validación de los resultados. Por un lado, tras recibir los datos de Macrogen S.L., las secuencias fueron editadas y ensambladas. Se realizaron comparaciones mediante la herramienta BLAST en la base de datos GenBank (NCBI) y en bases de datos taxonómicas curadas específicas para microalgas y cianobacterias. Además, se emplearon métodos de Máxima Verosimilitud (ML) para la construcción de árboles filogenéticos.

Como producto de este esfuerzo, se logró el aislamiento y la estabilización de 37 clones de microorganismos fotosintéticos, los cuales han sido registrados e incorporados a la

colección oficial del Banco Español de Algas, quedando disponibles para su caracterización molecular y evaluación biotecnológica.



Conjunto de clones aislados durante el proyecto ALGASAL⁺ y que pasan a formar parte de la Colección del Banco Español de Algas.

En Canarias, concretamente en Roque Prieto, los resultados muestran una elevada biodiversidad cultivable adaptada a condiciones de fuerte hidrodinamismo y salinidad fluctuando:

Cianobacterias

Se han identificado géneros como *Leptothoe* sp., *Spirulina* sp., *Cymatolege* sp. y *Tenebriella* sp..

Diatomeas

Se ha identificado la gran presencia de géneros bentónicos y pelágicos, confirmándose la presencia de *Navicula* sp., *Skeletonema menzeli*, *Amphora* sp., *Halamphora* sp. y *Nitzschia* sp.. Se encuentran pendiente de confirmación final las especies *Thalassiosira* sp. y *Chaetoceros tenuissimus*.

Otras microalgas

Se ha detectado la presencia del dinoflagelado *Amphidinium carterae* y de algas verdes como *Ulvella leptochaete*. Esta última se identificó además como principal epífito microscópico sobre *Ulva lactuca* en los muestreos de julio y octubre 2025.

En cuanto a las microalgas identificadas en la salmuera del ITC, se ha aislado con éxito *Navicula* sp. y una segunda cepa de diatomea pendiente de identificar.

Por otra parte, la bioprospección en Andalucía, centrada en las Salina abandonada de San Rafael y la salmuera y el fotobiorreactor del IFAPA La Cañada, ha permitido identificar microorganismos con una resistencia extrema a la hipersalinidad:

- *Polulichloris* sp., una microalga verde aislada en la salmuera de las instalaciones del IFAPA La Cañada y *Dunaliella* sp. aislada a partir de la muestra recolectada en el sistema de cultivo del fotobiorreactor de las mismas instalaciones.

- *Dunaliella salina* y *Asteromonas* sp., ambas actualmente en fase de confirmación molecular y recolectadas en la salina de San Rafael

La implementación de técnicas de secuenciación masiva (NGS) permitió obtener una huella genética completa del ecosistema en el Punto 1 de Roque Prieto, el área de máxima influencia del vertido de salmuera. Esta metodología reveló una biodiversidad latente que supera ampliamente la capacidad de detección del aislamiento tradicional.

El análisis bioinformático, basado en la agrupación de secuencias con similitud superior al 97%, identificó una riqueza taxonómica masiva distribuida en más de 1.500 Unidades Taxonómicas Operacionales (OTUs):

- Fracción eucariota: Se registró una variación estacional significativa, contabilizando 869 OTUs en la campaña de marzo frente a 496 en mayo. En este grupo predominaron las diatomeas, clorofitas y diversas especies de la clase *Ulvophyceae*.
- Fracción procariota: Se detectaron entre 688 y 769 OTUs según la temporada, con una dominancia clara de las cianobacterias sobre otros grupos bacterianos.

El análisis de abundancia relativa permitió describir una dinámica biológica marcada por la estacionalidad y la especialización funcional frente al estrés salino:

- En el mes de marzo se observó un predominio de los géneros *Nitzschia* spp. y *Navicula* sp.. Sin embargo, hacia mayo la comunidad realizó una transición hacia la dominancia de *Cocconeis placentula*, detectándose también otros géneros como *Tabularia*, *Amphora* y *Thalassiosira*.
- Además de la presencia esperada de *Tetraselmis*, el metabarcoding identificó géneros como *Chloroidium*, *Pseudendoclonium*, *Ochlochaete* y *Pycnococcus*, los cuales mostraron una abundancia notablemente superior durante mayo.
- Se identificaron 11 géneros distintos entre los más abundantes. Destaca la presencia exclusiva de *Pleurocapsa*, *Acaryochloris* y *Phormidesmis* en marzo, mientras que el género *Planktothricoides* apareció únicamente bajo las condiciones de mayo.
- La alta sensibilidad de la técnica permitió registrar la presencia del dinoflagelado *Pelagodinium* y del alga parda *Didymoeca* sp., organismos que no habían sido capturados mediante muestreo físico directo.

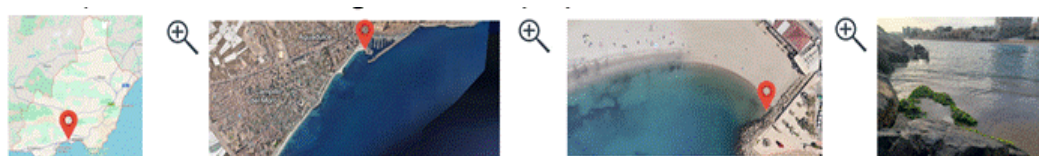
Este inventario masivo constituye una herramienta fundamental para evaluar la resiliencia de la biodiversidad frente a las condiciones de hipersalinidad, proporcionando una visión cuantitativa de cómo el ecosistema fotosintético se adapta y recupera a lo largo del ciclo anual.

La acción A1.1 se valora como satisfactoria, habiendo cumplido el hito de dotar al proyecto de un reservorio propio de biodiversidad nativa, validado genéticamente y pre-adaptado a las condiciones extremas de los efluentes de desalación.

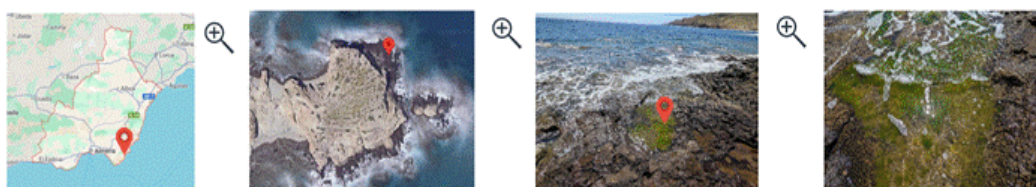
A1.2. Bioprospección, aislamiento, caracterización taxonómica y conservación de la biodiversidad de macroalgas bentónicas asociadas a los vertidos de salmuera

La bioprospección de macroalgas se ejecutó mediante cuatro campañas estacionales diseñadas para capturar la variabilidad de las comunidades en dos regiones bioclimáticas distintas. En Gran Canaria, los trabajos se centraron en el entorno del emisario de Roque Prieto (Gáldar), estableciendo un gradiente de muestreo donde el "Punto 1" representó el área de máximo estrés por vertido directo de salmuera. Complementariamente, se muestrearon las canalizaciones del ITC (Pozo Izquierdo) para identificar especies pioneras capaces de colonizar infraestructuras industriales.

En Andalucía, la bioprospección de macroalgas tuvo un carácter itinerante debido a la naturaleza cambiante del litoral y a fin de cubrir diversos nichos ecológicos, incluyendo sustratos artificiales en el puerto de Aguadulce, un entorno natural como la Playa del Embarcadero y sistemas de esteros en la salina Tres Amigos.



Localización geográfica del punto de muestreo correspondiente al intermareal del espigón del puerto deportivo de Aguadulce (Roquetas de mar, Almería).



Localización geográfica del punto de muestreo correspondiente al intermareal de la Playa del Embarcadero (Níjar, Almería).



Localización geográfica del punto de muestreo correspondiente al estero de la salina abandonada Tres amigos (San Fernando, Cádiz).

Una vez en el laboratorio, se realizó una primera clasificación basada en caracteres macroscópicos y una limpieza exhaustiva de las muestras mediante el uso de pinzas para eliminar epífitos y sedimentos adheridos. Para garantizar la pureza de la muestra biológica, se aplicó un shock osmótico con agua destilada, lo que facilitó la eliminación de

organismos y restos de sales superficiales sin comprometer la integridad celular de las macroalgas.

A continuación, se tomaron porciones representativas de cada grupo de muestras y se introdujeron en tubos Eppendorf para la posterior extracción de ADN. En el caso de las muestras de Andalucía, éstas fueron recolectadas y tratadas en la Universidad de Almería (UAL) y posteriormente enviadas al Banco Español de Algas (BEA) para su identificación.

Dada la alta plasticidad morfológica de las macroalgas, especialmente dentro del género *Ulva*, se implementó un robusto flujo de trabajo molecular para evitar errores de clasificación taxonómica. El proceso comenzó con la extracción de ADN genómico mediante protocolos optimizados para tejidos con alto contenido en polisacáridos (Hossen *et al.*, 2024), seguido de la amplificación por PCR de marcadores genéticos específicos. Se utilizó principalmente el gen cloroplástico *tufA*, reconocido como el "barcode" estándar para clorofitas verdes, junto con los marcadores nucleares 18S e ITS. Las secuencias obtenidas fueron analizadas mediante métodos de Máxima Verosimilitud (ML), lo que permitió construir árboles filogenéticos con un alto soporte estadístico para confirmar la identidad de las especies frente a bases de datos internacionales.

Al igual que en la A1.1., como complemento innovador a la bioprospección física, se implementó la técnica de análisis de ADN ambiental (ADNa) mediante metabarcoding, una metodología clave para obtener una huella genética completa del ecosistema, focalizado estratégicamente en el Punto 1 de Roque Prieto debido a la alta complejidad técnica, los costes asociados y el masivo volumen de datos generado.

La aplicación de estas técnicas permitió certificar la presencia de taxones clave para el proyecto. El esfuerzo de identificación molecular en Roque Prieto permitió validar la presencia de diversas cepas del género *Ulva*, confirmando la coexistencia de especies nativas con especies introducidas de difícil distinción morfológica. Las cepas identificadas y validadas genéticamente son:

- *Ulva australis*. Identificada en noviembre 2024, julio 2025 y octubre 2025. Se trata de una especie introducida accidentalmente, detectada por primera vez en Canarias durante este proyecto y cuya detección fue posible gracias al marcador *tufA*.
- *Ulva lactuca*. Presente en todos los muestreos estacionales, con alta frecuencia en las campañas de primavera y verano.
- *Ulva tepida*. Detectada específicamente en julio de 2025 en zonas de encharcamiento con influencia directa de la salmuera. Su estatus biogeográfico en las islas requiere de estudios poblacionales más profundos para confirmar su grado de naturalización.

- *Chaetomorpha linum*. Macroalga verde filamentosa identificada en el muestreo de marzo 2025, característica de ambientes con fluctuaciones de salinidad y nutrientes.
- *Ulva* sp. Muestras identificadas a nivel de género, pero con marcadores negativos para especie en marzo y julio 2025.

En el litoral andaluz, la bioprospección tuvo un carácter más itinerante debido a la menor estabilidad de las poblaciones de macroalgas en los puntos seleccionados. Además, la identificación de algunas muestras se vio afectada por retos derivados de la degradación del material genético.

- *Ulva compressa*: Identificada en la muestra proveniente de Aguadulce (Roquetas de mar).

Las muestras recolectadas en la Playa del Embarcadero y el estero de la Salina Tres Amigos presentaron bajos ratios de pureza de ADN debido a la presencia de inhibidores, quedando clasificadas provisionalmente como *Ulva* sp. a nivel morfológico.

El procesamiento inicial de las muestras de ADN en el punto 1 ha permitido detectar la presencia de taxones que no fueron recolectados físicamente, enriqueciendo el inventario de biodiversidad:

- *Saccharina japonica* (Phaeophyceae) y *Microspongium alariae*/Chordaria flagelliformis (pendiente de confirmación definitiva) (Phaeophyceae).
- *Cladophora* spp. (Chlorophyta).
- *Rhodochaete* spp., pendiente de confirmación definitiva (Rhodophyceae).

Debido a la complejidad y al volumen masivo de datos generados por esta tecnología NGS, los resultados presentados corresponden a las fases iniciales. El procesamiento bioinformático de las series estacionales del resto de estaciones permitirá, una vez finalizado, describir la dinámica anual completa de la comunidad y su resiliencia frente al estrés salino continuo del vertido de salmuera.

La Acción A1.2 se valora como un éxito técnico fundamental. Ha permitido superar las limitaciones de la taxonomía visual clásica mediante el uso de marcadores específicos (*tufA*, 18S e ITS), proporcionando una base científica sólida para las fases de escalado. El descubrimiento de *U. australis* y la detección de taxones mediante ADN subrayan la precisión alcanzada, consolidando un catálogo de biodiversidad nativa e introducida esencial para el desarrollo de sistemas de biofiltración industrial.

A1.3. Caracterización fisiológica y posibilidades biotecnológicas de las algas bioprospectadas e identificadas (escala laboratorio)

La Acción A1.3. representa la transición crítica del laboratorio a la operatividad biotecnológica, centrada en el estudio del comportamiento biológico de las cepas bajo condiciones controladas. Esta fase transforma el conocimiento taxonómico previo en

capacidad operativa real, evaluando la respuesta de las especies ante los parámetros ambientales que definirán su entorno de cultivo final.

A continuación, se detalla el desarrollo ampliado de esta acción:

Tras la recepción y estabilización de las muestras en el Banco Español de Algas, se inició un protocolo de activación diseñado para garantizar el vigor metabólico antes de los ensayos de estrés. Las cepas se mantuvieron en cámaras con parámetros controlados ($24 \pm 1^\circ\text{C}$, fotoperiodo 16:8 y pulsos de CO_2). Un factor clave fue el ajuste nutricional mediante el uso de medio f/2 modificado con amonio ($50 \mu\text{M}$), preparando a los ejemplares para la asimilación eficiente de nitrógeno en condiciones reales de invernadero.

Debido a diversas contingencias administrativas y retrasos en la gestión por parte de la ULPGC, se adoptó una estrategia de optimización operativa en la que la UAL llevó a cabo la caracterización fisiológica de las muestras locales. Esta decisión representó la vía más lógica desde el punto de vista técnico: permitió aprovechar biomasa ya aclimatada y adaptada a los sistemas locales, evitando los riesgos del transporte y, fundamentalmente, eliminando la necesidad de someter a los cultivos a un ciclo redundante de readaptación entre las condiciones de cultivo del BEA y las de Almería.

Caracterización fisiológica de macroalgas (género *Ulva*)

El trabajo se priorizó con el género *Ulva*, descartando otras especies como *Chaetomorpha linum* por su nula adaptación a los sistemas de cultivo.

- *Ulva lactuca* (Canarias): Se evaluaron siete líneas procedentes de Roque Prieto. Se observó que las cepas del Punto 1 (área de vertido directo) poseían una estabilidad superior, manteniéndose activas hasta agosto, mientras que las de los puntos 2 y 3 se degradaron en mayo. Un ensayo comparativo con la cepa 1.1 reveló que el cultivo a salinidad natural (62 ups) era inviable técnicamente por degradación inmediata, mientras que la misma cepa a salinidad de agua de mar (37 ups) mostró un vigor excepcional, alcanzando picos de 53,85 g de peso fresco (PF).
- *Ulva australis* (Canarias): Esta cepa mostró una cinética de crecimiento constante, logrando cuadruplicar su biomasa en solo 34 días durante la fase de activación inicial.

Con respecto a la caracterización de las muestras de Andalucía, ésta se centró exclusivamente en *Ulva compressa* al ser la única especie de la zona que pudo ser identificada de forma concluyente mediante análisis molecular, superando los retos de degradación de material genético ya mencionados. Asimismo, esta especie demostró una capacidad de adaptación superior a las condiciones de cultivo controlado, lo que permitió obtener resultados estables y representativos frente al resto de las muestras recolectadas.

Esta cepa fue recolectada en las instalaciones del centro IFAPA La Cañada, donde se encontraba previamente aclimatada a condiciones ambientales de exterior y niveles de hipersalinidad. Dado que el material biológico ya presentaba una estabilidad fisiológica y un fenotipo adaptado a estas condiciones extremas de cultivo controlado, se consideró

que una caracterización previa en condiciones de laboratorio (indoor) resultaría redundante y no representativa del estado metabólico real de la cepa en su entorno de producción.

Caracterización de microalgas y cianobacterias

El proceso de obtención de cultivos monoclonales estables requirió un periodo de entre cuatro y siete meses bajo las condiciones subóptimas de la cámara de cultivo de la Colección del BEA.

En cuanto a la selección de cepas, ante la gran cantidad de clones aislados y la proximidad de la finalización del proyecto, se optó por los clones con crecimiento más vigoroso en medio de elevada salinidad (≈ 60 ups) y, entre ellos, destacaba una diatomea aislada de la salmuera del ITC (pendiente de confirmar la identificación) y la cianobacteria *Cymatolege* sp. aislada en las muestras de Roque Prieto. En cuanto a las cepas obtenidas en las salinas de San Rafael, identificadas como *Dunaliella salina*, su pre-adaptación natural a condiciones extremas (superiores a 120 ups) permitió su mantenimiento directo en dichas salinidades, garantizando además la pureza de los cultivos por exclusión competitiva.

- Cianobacteria *Cymatolege* sp.: El seguimiento mediante densidad óptica mostró irregularidades debido a la formación de agregados celulares. Esto evidenció la necesidad de implementar protocolos de disgregación mecánica (homogeneización) para estandarizar las medidas en fases posteriores.
- Diatomea: Se observó fragilidad mecánica durante la activación, con frecuente rotura celular bajo regímenes de aireación estándar, lo que limitó su caracterización completa en esta etapa.
- Microalgas del género *Dunaliella*: Debido a esta adaptación previa consolidada y a la necesidad de optimizar los tiempos experimentales, se prescindió de una caracterización fisiológica en condiciones de laboratorio. En su lugar, tanto las cepas recogidas en las salinas de San Rafael, como la recolectada en los reactores a 60 ups, identificada como *Dunaliella* sp., se mantuvieron directamente en sus niveles de salinidad de origen para proceder de forma inmediata a los ensayos en condiciones de exterior, asegurando así que las respuestas observadas fueran representativas de su comportamiento en entornos de producción real.

La Acción A1.3 se valora como muy satisfactoria y determinante, ya que actuó como el filtro técnico necesario para transformar el inventario biológico inicial en una selección estratégica de "activos biotecnológicos".

En el ámbito de las microalgas, esta fase fue crítica para identificar que, si bien se logró una gran diversidad inicial, no todas las cepas eran aptas para el cultivo industrial. Se descartaron taxones inestables (como la cianobacteria *Cymatolege* sp. por su agregación celular o las diatomeas por su fragilidad mecánica), pero se confirmó el potencial de las microalgas del género *Dunaliella*, la cual demostró una adaptación natural excepcional a

salinidades superiores a 120 ups, consolidándose como una candidata de alto valor para entornos de hipersalinidad extrema.

En cuanto a las macroalgas, se validó la alta plasticidad y vigor de las especies foliares. Mientras que en Canarias la *Ulva australis* se posicionó como la cepa más robusta, en Andalucía la *Ulva compressa* destacó como la única especie capaz de superar los retos de degradación genética y adaptarse con éxito a las condiciones de cultivo externo en el IFAPA La Cañada.

A1.4. Selección de cepas de algas con potencial biotecnológico

Una vez consolidado el inventario de biodiversidad y validadas taxonómicamente las cepas nativas de Andalucía y Canarias, la acción A1.4. se establece como el nexo crítico entre la bioprospección y la aplicación biotecnológica del proyecto ALGASAL⁺. El objetivo central de esta fase es determinar, bajo condiciones estrictas de laboratorio, qué organismos poseen no solo la capacidad de sobrevivir a la hipersalinidad, sino de actuar como agentes activos de biorremediación mediante la asimilación eficiente de nutrientes en efluentes industriales.

La selección de las cepas para estos ensayos no fue aleatoria, sino que respondió a criterios de robustez observados durante las fases de aislamiento y estabilización. Se priorizaron aquellos taxones que demostraron un crecimiento vigoroso y una estabilidad fisiológica superior ante el estrés iónico, características indispensables para su futuro escalado en sistemas de cultivo expuestos a vertidos de desaladoras:

- Macroalgas foliares del género *Ulva*: *Ulva lactuca* y *Ulva australis* (Canarias), junto con *Ulva compressa* (Andalucía), elegidas por su elevada superficie de contacto para la biorremediación.
- Microorganismos extremófilos: Microalgas del género *Dunaliella*, por su probada resistencia a condiciones de hipersalinidad, y la cianobacteria *Cymatolege sp.*, como representante de los tapices microbianos de entornos hipersalinos.

En este contexto, se diseñaron diferentes estrategias experimentales para validar la viabilidad del sistema:

- Estrategia de tolerancia y aclimatación osmótica: Se comparó la resiliencia biológica mediante dos enfoques: el choque osmótico directo (exposición súbita a salinidades de hasta 120 ups) y la aclimatación progresiva (incrementos graduales en ciclos semanales). Esta comparativa permitió establecer los límites de seguridad operativa ante posibles fallos técnicos en una planta desaladora real.
- Estrategia de evaluación de biorremediación: Se establecieron protocolos de medición sistemática para cuantificar la capacidad de las cepas para actuar como sistemas de depuración.



Fotografía del ensayo A: Evaluación de la robustez de *Ulva lactuca*, recolectada en un entorno hipersalino natural (62 ups), ante incrementos salinos súbitos.



Fotografía del ensayo B: Evaluación de la capacidad de adaptación gradual de *Ulva australis*, procedente de un entorno marino estándar (38 ups), hacia condiciones de salinidad extremas.

Tras la ejecución de los ciclos experimentales, los datos obtenidos permitieron discriminar entre la viabilidad teórica y la operatividad industrial de cada especie. Los resultados que se presentan a continuación detallan la capacidad de estos organismos no solo para sobrevivir, sino para actuar como sistemas activos de biofiltración en condiciones de hipersalinidad extrema:

- *Ulva australis*: Fue la cepa con mejor desempeño global. Bajo condiciones de aclimatación progresiva, mantuvo tasas de crecimiento específicas positivas y una estabilidad metabólica total incluso a 80 ups.
- *Ulva lactuca*: Aunque mostró una excelente eficiencia de asimilación de nutrientes (superando el 98%), a niveles de 80 ups presentó mayor fragilidad tisular, limitando la producción masiva de biomasa.
- *Ulva compressa*: En los ensayos realizados en Andalucía, se confirmó como la especie más apta para sistemas abiertos, tolerando con éxito las fluctuaciones salinas.

- *Dunaliella* sp.: Se confirmó su capacidad de crecimiento en salinidad extrema (incluso por encima de 120 ups), consolidando su valor biotecnológico para la obtención de metabolitos de interés en efluentes saturados donde otros taxones ven inhibido su crecimiento.
- *Cymatolege* sp.: Los resultados obligaron a su descarte técnico, debido a una inestabilidad productiva crítica y a la formación de agregados que impedían un manejo eficiente del cultivo.

La Acción A1.4. se valora como el eje de validación operativa a escala de laboratorio del proyecto. Su relevancia reside en haber demostrado que, mediante una adaptación gradual y un manejo nutricional específico, es posible alcanzar eficiencias de remoción de nutrientes del 98% en condiciones de hipersalinidad. Esta fase permitió optimizar los recursos del proyecto al centrar los esfuerzos de escalado en los taxones de mayor rendimiento y estabilidad metabólica, asegurando la viabilidad del modelo de biorremediación propuesto en ALGASAL⁺.

A1.5. Estudio de la composición bioquímica de las cepas de algas seleccionadas de interés biotecnológico (aplicaciones en la industria alimentaria)

La acción A1.5. representa la fase terminal de la caracterización biológica en la Actividad 1, centrada en evaluar el potencial biotecnológico de la biomasa producida desde una perspectiva nutricional e industrial. Una vez validada la resiliencia fisiológica de las especies frente a la hipersalinidad, resulta imprescindible determinar cómo este estrés ambiental altera la síntesis de macromoléculas y metabolitos de interés. El objetivo es identificar si las condiciones extremas de las salmueras pueden actuar como un inductor metabólico que incremente el valor comercial de la biomasa, especialmente para su aplicación en la industria alimentaria, cosmética y nutracéutica.

Aunque inicialmente se consideraron diversos taxones, los retos técnicos y biológicos derivados de la estabilización y la disponibilidad de biomasa llevaron a focalizar este estudio detallado en la especie *Ulva australis*. Esta decisión técnica se fundamentó en limitaciones críticas detectadas en el resto de los organismos: la cianobacteria *Cymatolege* sp. fue excluida debido a que el prolongado periodo requerido para estabilizar su cultivo impidió obtener biomasa suficiente en los plazos del proyecto, mientras que en el caso de *Ulva lactuca*, el volumen de material final tras los ensayos de hipersalinidad resultó insuficiente para garantizar los triplicados analíticos necesarios para la validez científica del estudio.

En contraste, *Ulva australis* demostró una plasticidad metabólica excepcional durante los ensayos de aclimatación progresiva —sobreviviendo con éxito a todo el gradiente desde 40 hasta 80 ups—, convirtiéndose en el modelo biológico ideal para evaluar los cambios en el perfil proximal, la composición de pigmentos, la actividad antioxidante y la reconfiguración de los perfiles de ácidos grasos.

Por otra parte, para las cepas de Almería, dado que los ejemplares de *Ulva compressa* y *Dunaliella* sp. ya se encontraban adaptados a condiciones de exterior e hipersalinidad en su origen, se determinó realizar su caracterización de forma prioritaria tras la finalización de los ensayos *outdoor* de la Actividad A2. Esta decisión estratégica permitió evaluar la composición de la biomasa en un escenario de producción real, asegurando que los perfiles obtenidos fueran representativos del rendimiento industrial de estas cepas adaptadas.

Biomasa de partida y preparación de las muestras

La biomasa de partida utilizada para la caracterización bioquímica fue el resultado del ensayo de evaluación de la adaptación progresiva de *Ulva australis* a condiciones de hipersalinidad. Este proceso de aclimatación se llevó a cabo durante tres ciclos de siete días cada uno, exponiendo a los ejemplares a gradientes crecientes de salinidad (40, 50, 60 y 80 ups). Tras finalizar el periodo de exposición, la biomasa de cada tratamiento fue recolectada y sometida a un proceso de lavado con agua destilada para eliminar el exceso de sales superficiales, procediendo inmediatamente a su congelación y posterior liofilización. Este procedimiento aseguró la estabilización de los analitos y la obtención de una muestra homogénea para los análisis de composición proximal, pigmentos, metabolitos secundarios y perfil lipídico detallados a continuación.

Metodología analítica

Para asegurar la reproducibilidad y el rigor científico, se emplearon métodos estandarizados y referenciados:

- **Preparación de la muestra:** la biomasa fue recolectada, lavada, congelada y liofilizada para su posterior análisis.
- **Cenizas:** Determinación gravimétrica mediante calcinación a 550°C (UNE-EN 17605:2022; Van Wychen y Laurens, 2015).
- **Proteínas:** Método Kjeldahl (AOAC, 1984) para la determinación de nitrógeno total. El porcentaje de proteína se determinó multiplicando el porcentaje de nitrógeno por el factor de conversión 5,95.
- **Lípidos totales:** Extracción por el método de Folch (cloroformo:metanol 2:1 v/v) (Folch *et al.*, 1957).
- **Carbohidratos:** calculados por diferencia.
- **Perfil de ácidos grasos:** Transmetilación según Christie (1982) y Galindo *et al.*, (2022), con posterior análisis por cromatografía de gases.
- **Pigmentos:** Cuantificación espectrofotométrica de clorofilas y carotenoides totales (Wellburn, 1994; Lichtenthaler y Buschmann, 2001).
- **Fenoles y capacidad antioxidante:** Método de Folin-Ciocalteu y ensayo de inhibición del radical libre DPPH, respectivamente (Singleton y Rossi, 1965; Blois, 1958).

Los análisis revelaron que el cultivo de *Ulva australis* en condiciones de hipersalinidad no sólo es viable, sino que actúa como un estímulo para la síntesis de compuestos de alto valor:

- Se observó un incremento correlativo entre la salinidad y el contenido proteico. En *Ulva australis*, las proteínas aumentaron desde un 19-20% en condiciones control hasta un máximo del 32,86% a una salinidad de 80 ups. Este valor duplica los rangos estándar de macroalgas en medio natural, situándola al nivel de fuentes proteicas terrestres como las leguminosas.
- El contenido de lípidos totales se mantuvo estable, pero se produjo una mejora en la calidad del perfil graso. Se detectó un aumento en los ácidos grasos poliinsaturados (PUFAs), alcanzando el 10,94% a 80 ups, con una presencia destacada de ácido linolénico (Omega-3).
- La mayor acumulación de compuestos fenólicos y capacidad antioxidante se registró en el nivel intermedio de 60 ups. Esto indica que existe un punto óptimo de estrés donde el alga maximiza sus mecanismos de defensa sin llegar a la degradación tisular que ocurre a 80 ups.
- Como era de esperar, la biomasa cultivada en salmuera presentó un alto contenido en cenizas (hasta el 37%), lo que refleja una riqueza mineral de interés para suplementos nutricionales o fertilizantes.

La Acción A1.5. se valora como la caracterización analítica de referencia que confirma el valor biotecnológico de la biomasa producida bajo estrés salino controlado. Los resultados obtenidos son fundamentales, ya que demuestran que el cultivo en efluentes de salmuera no solo es viable para la biorremediación, sino que permite la obtención de productos con un perfil nutricional superior (especialmente en términos de densidad proteica y capacidad antioxidante).

Esta fase constituye el aval científico necesario para el escalado del proceso, estableciendo los estándares de calidad y las expectativas de rendimiento bioquímico que deberán ser validados y contrastados en las fases de cultivo en condiciones exteriores. Se concluye, por tanto, que la biomasa de *Ulva australis* presenta una plasticidad metabólica que la convierte en una candidata de alto valor para la bioeconomía circular, sentando las bases técnicas para los ensayos en entornos reales.

c. Actividad A2: Diseño, desarrollo y optimización del cultivo outdoor a escala piloto.

Esta actividad consiste en diseñar y operar proyectos pilotos demostrativos a escala real en Gran Canaria y Almería para evaluar la productividad de cultivos de algas utilizando salmuera como medio de crecimiento. Validación de la tecnología en entornos operativos reales para alcanzar un nivel de madurez TRL 8.

- Ensayos en Gran Canaria (ITC): Cultivo de algas nativas utilizando salmuera de una desaladora industrial procedente de la Mancomunidad del Sureste.
- Ensayos en Almería (UAL): Cultivo de algas nativas utilizando salmuera de la planta AGROCONNECT.
- Cultivo de macroalgas: Evaluación de la eficiencia del cultivo de macroalgas nativas utilizando la salmuera como parte del medio de cultivo.
- Cultivo de microalgas: Evaluación de la eficiencia del cultivo de microalgas nativas utilizando la salmuera como parte del medio de cultivo.
- Acople con microalgas: Pruebas de crecimiento de las macroalgas con los efluentes de las microalgas cultivadas en salmuera.

Se detalla a continuación las acciones realizadas en esta actividad:

A2.1. Diseño y acondicionamiento de las instalaciones para el cultivo a escala piloto de las algas seleccionadas (TRL6-7).

El ITC ha colocado una planta piloto con tanques de varios tamaños y diferentes capacidades (tanques circulares de 100 L y tanques semicirculares de 750 L) para la realización del cultivo de las algas outdoor. Para ello, se ha acondicionado el terreno con grava y se ha nivelado y allanado para poder instalar los tanques encima. Se ha creado un sistema de sombreado para proteger a las algas de la acción directa del sol. Además se ha limpiado y acondicionado un depósito de 90 m³ para el almacenamiento de la salmuera como parte del medio de cultivo.

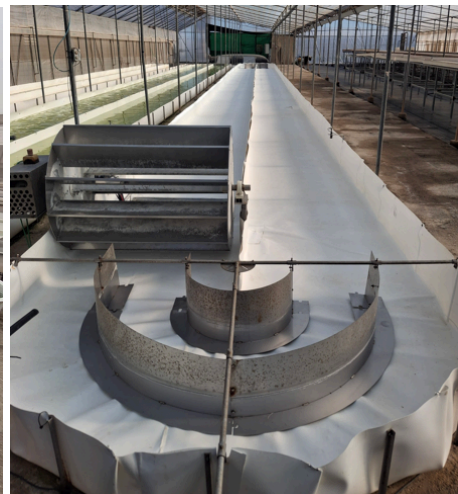
Se han acondicionado los reactores de cultivo para mejorar su operatividad, seleccionando y adquiriendo bombas adecuadas, dosificadores para los nutrientes, etc. Se han creado todo un sistema de líneas y conexiones necesarias tanto para la toma de agua necesaria para la entrada al cultivo como para su devolución después de que las algas sean cultivadas así como para el transporte de la salmuera procedente de la planta desaladora al depósito de 90m³ y de ahí a los tanques. E

sta acción contempla acciones clave puesto que un buen planteamiento inicial de la instalación y una óptima operatividad de las instalaciones pueden impulsar una ejecución fluida y eficiente del resto de actividades. A pesar de que esta actividad haya requerido más tiempo de lo esperado inicialmente y hayamos tenido que pedir una ampliación en el cronograma haciendo que el resto de actividades también sufran un retraso, el resultado final de la actividad de diseño y acondicionamiento ha resultado muy satisfactorio. Desde el ITC que no hemos trabajado con cultivo de macroalgas outdoor previamente, estas

instalaciones han sido creadas desde cero por y para el proyecto.



La UAL ha acondicionado un reactor tipo tanque aireado de 2 m² y 0.75 m³, tres raceways de 7 m² y 1 m³, y un raceway piloto de 100 m³ y 20 m³ para el cultivo de macro y microalgas en salmuera. El uso de estos reactores ha permitido la comparativa de cultivo de macroalgas en dos sistemas diferentes (tanque aireado y raceways a diferentes escalas), y además, al tratarse el mismo sistema de cultivo que utilizan en las instalaciones del ITC, permite la comparativa de crecimiento de macroalgas en ambas ubicaciones. Se han realizado las conexiones para el transporte de las salmueras producidas en la desaladora de investigación al tanque de alimentación de los reactores de macro y microalgas.



A2.2. MACRO: Aclimatación, escalado y monitorización de las macroalgas seleccionadas cultivadas outdoor con vertidos de salmuera procedentes de desaladoras.

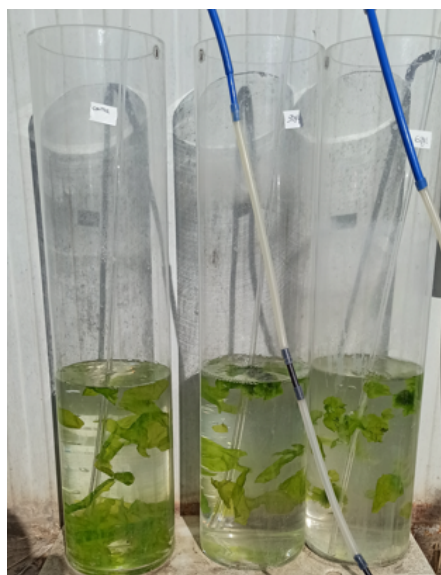
El ITC ha llevado a cabo ensayos con parte de la biomasa de macroalgas que se ha recogido del medio con el objetivo de 1) testear la operatividad de las instalaciones que se han creado de la planta piloto y 2) realizar una evaluación preliminar de cómo se adaptan las macroalgas a las condiciones de hipersalinidad. Estos primeros ensayos nos han permitido identificar imperfecciones en el acondicionamiento de la planta piloto y poder corregirlas. Una vez la biomasa recogida del medio ha crecido y se ha adaptado adecuadamente en las instalaciones del BEA, y se pudo contar con los resultados genéticos que nos permitieron identificar las especies, se dió inicio al escalado del cultivo. El ITC trabajó con la macroalga *Ulva australis* que es la que se ha identificado en los puntos de muestreo de Gran Canaria y la que mayor potencial biotecnológico mostró.

Como el BEA no pudo suministrar suficiente biomasa de *Ulva australis* ya adaptada a hipersalinidad, hubo que adaptar esta macroalga a la salinidad partiendo del agua de mar. Primero se cultivó en pequeños tanques con agua de mar, ampliando después el volumen hasta llenar todos los tanques. Tras varias semanas de crecimiento en condiciones outdoor en Pozo Izquierdo, se inició el aumento gradual de la salinidad.

El cultivo de esta macroalgas así como su posterior aclimatación a las condiciones de hipersalinidad se han desarrollado durante meses. Primeramente se empezó a cultivar esta alga en un tanque pequeño de 100 L con agua de mar, y posteriormente se fué escalando el cultivo hasta llenar todos los tanques pequeños. Una vez los 6 tanques pequeños están adaptados al agua de mar y plenamente funcionando se empieza con la subida progresiva de la salinidad. Todos los días el cultivo se monitoriza dos veces al día (una a primera hora y otra a la tarde) donde se miden parámetros fisicoquímicos como la salinidad, temperatura, pH, nutrientes, radiación solar con el objetivo de hacer un seguimiento del cultivo diario. También se mide la fluorescencia con el objetivo de ver el estado fisiológico de las algas. El cosechado tiene lugar una vez a la semana, donde la biomasa se pesa, si hubiese suficiente parte se retira para su posterior tratamiento y el resto se utiliza para inocular de nuevo los tanques.



La UAL ha realizado los ensayos de adaptación del cultivo de las diferentes cepas de *Ulva* a mayores salinidades en columnas de burbujeo de 10 L de capacidad al exterior, evaluando el crecimiento de las distintas macroalgas recolectadas en condiciones externas a distintas salinidades. Las columnas han sido inoculadas con 2 g de peso fresco de *Ulva*, y se han llevado a diferentes salinidades, desde 25 a 60 g·L⁻¹. Se ha medido el peso fresco de cada cultivo cada dos días durante un periodo de 2-3 semanas.



Una vez seleccionada la cepa (*Ulva compressa*), se ha usado la biomasa adaptada a las distintas salinidades para el escalado al cultivo en reactores tipo tanque aireado de 2 m² y raceway de 7 m², donde se han optimizado las condiciones de cultivo.



ulva

Además con carácter formativo y con el objetivo de aprender técnicas de cultivo se asistió al curso *Ulva cultivation systems: design, construction & optimization* realizado por la COST Action CA20106 (ULVA: Tomorrow's "Wheat of the sea", a model for an innovative mariculture) de la iniciativa europea COST (European Cooperation in Science and Technology) (<https://seawheatcost.haifa.ac.il>).

El curso se realizó de manera presencial en un centro de investigación en Kavala (Grecia) del 1 al 4 de abril de 2025. En este curso se abordaron principalmente temas como la eficiencia de absorción de nutrientes de *Ulva* sp. a diferentes densidades de población, la determinación de compuestos o el estudio de la morfología, fotosíntesis de *Ulva* y su cultivo a diferentes densidades. Este curso se enmarcaría tanto en esta acción como en la A2.4 Optimización de las condiciones del cultivo outdoor de las macroalgas con vertidos de salmuera de desaladoras.



A2.3. MICRO: Aclimatación, escalado y monitorización de las microalgas seleccionadas cultivadas outdoor con vertidos de salmuera y su acople posterior al sistema A2.2. (biorremediación de excedentes de los nutrientes de las micro).

Como resultado de las limitaciones técnicas identificadas en la Acción A1.3, se determinó la inviabilidad de los clones aislados tanto en Roque Prieto como en la salmuera del ITC para el escalado productivo bajo las condiciones del proyecto. Por un lado, la elevada fragilidad celular de la diatomea aislada a partir de la salmuera del ITC (pendiente de identificar) ante el estrés mecánico impedía su cultivo en sistemas con aireación y agitación, elementos indispensables para el desarrollo de biomasa en invernadero. Por otro lado, aunque la cianobacteria *Cymatolege* sp., recolectada y aislada en Roque Prieto (Gran Canaria), mostró capacidad de adaptación a medios hipersalinos, su marcada tendencia a formar agregados imposibilitó una monitorización rigurosa del crecimiento mediante densidad óptica, dificultando el control de los ensayos.

Ante este escenario y para que se pudieran realizar el resto de actividades, se optó por seleccionar una cepa local de microalga *Dunaliella salina*, con la que el ITC cuenta con experiencia previa. Esta cepa BEA1958 B de la microalga *Dunaliella salina* con la que se ha trabajado, fue aislada por el ITC (ITC5102) en las salinas de Tenefé, ubicadas en las proximidades de las instalaciones de Pozo Izquierdo, está clasificada, identificada en el GenBank y depositada en el BEA. Asimismo, se trata de una microalga cultivable en salmuera y previamente utilizada en otros proyectos desarrollados por el ITC, que además de su probada adaptación al entorno, permite una mayor estabilidad en sistemas de cultivo

convencionales y una trazabilidad precisa de su crecimiento, superando así los cuellos de botella detectados con las cepas anteriores.

En consecuencia esta cepa de *Dunaliella salina* se cultivó en condiciones indoor en el ITC y se empezó a escalar en la cámara de cultivo hasta conseguir biomasa suficiente para poder sacarla y cultivarla en condiciones outdoor.



Una vez outdoor se cultivó en reactores raceways de 250 L en condiciones de tanto de hipersalinidad directamente con la salmuera de la Mancomunidad del Sureste como con agua de mar para poder hacer la comparativa del crecimiento.

El cultivo estuvo durante semanas y la biomasa se cosechó y se post-procesó para su posterior análisis como parte de la actividad A3. Los efluentes también fueron guardados para después con ellos poder cultivar las macroalgas.

En la UAL se evaluaron a pequeña escala dos cepas de microalgas obtenidas durante los muestreos: *Dunaliella* sp. y *Dunaliella salina*, ambas cepas se cultivaron a diferentes salinidades, desde 60 a 120 g·L⁻¹ (ya que fueron muestreadas en zonas de alta salinidad), pero mostraron un crecimiento lento tanto en condiciones de laboratorio como en su cultivo en condiciones externas a todas las salinidades ensayadas..

Sin embargo, durante el periodo de cultivo de estas cepas, el cultivo se contaminó con otra cepa local, *Tetraselmis* sp., que obtuvo en poco tiempo una alta concentración, por lo que, tras su identificación, se seleccionó para su cultivo acoplado al cultivo de *Ulva*, estando ya adaptada a la salinidad deseada (60 g·L⁻¹). Cabe mencionar que, a pesar de realizar el esfuerzo de caracterizar dicha cepa a nivel molecular, por cuestiones temporales no se pudo realizar el proceso de aislamiento de la muestra; aún así, se procesó tratando de concentrar la mayor cantidad posible de la misma, se extrajo el ADN y se realizó PCR empleando distintos primers y explorando hasta 6 regiones distintas pero el resultado fueron secuencias solapadas cuya distinción y asignación era inviable. Por todo esto, se determinó la identificación a nivel morfológico empleando microscopía óptica.



A2.4. Optimización de las condiciones de cultivo outdoor de las macroalgas con vertidos de salmuera de desaladoras.

El ITC ha implementado el acondicionamiento de las instalaciones de la planta piloto prácticamente a lo largo de todo el proyecto debido a que trabajamos al aire libre y con organismos vivos por lo que hemos tenido muchos desafíos. En el ITC se han cultivado las macroalgas en tanques en circuitos abiertos, por lo que hemos pasado meses ajustando la concentración de los nutrientes, las tasas de renovación, la concentración de las algas en los

tanques, la aireación y la instalación de sombreado para que las algas no reciban demasiado radiación y se fotoinhiban. Cuando todas estas condiciones han sido optimizadas se procede a empezar a aumentar la salinidad.

Primeramente las macroalgas estuvieron cultivándose en los 6 tanques pequeños durante meses para adaptarse al agua de mar y a las condiciones de Pozo Izquierdo. Después se empezó a cosechar la biomasa y esa biomasa utilizarla para inocular y escalar los tanques de 750 L. Una vez están los tanques de 750 L llenos se dejan las algas creciendo en agua de mar y aclimatándose a esos volúmenes. Posteriormente se empieza a subir la salinidad. De los 6 tanques semicirculares de 100 L tres se mantienen con el agua de mar a modo de control y en los otros 3 se sube progresivamente la salinidad.

De los tanques semicirculares de 750L en tres de ellos se sube la salinidad y uno se mantiene con agua de mar a modo de control. Para poder aumentar la salinidad, en el depósito de 90 m³ (que previamente se limpió y se acondicionó para este proyecto) se mezcla la salmuera (60-70 ups) proveniente de la Mancomunidad del Sureste con el agua de mar (37 ups) filtrada de una cata de mar que tenemos en nuestras instalaciones. Esta mezcla se realiza en el depósito de 90 m³ pudiendo variar su proporciones y controlar así la salinidad que entra en los tanques, permitiendo que la salinidad se pueda subir de manera gradual cada dos semanas aproximadamente para que las algas se aclimaten de una manera progresiva y el cultivo no se muera.



Por su parte, la UAL cultivado *Ulva compressa* a 25, 45 y 60 g·L⁻¹ en las dos tecnologías seleccionadas y optimizadas, el tanque aireado de 2 m² y raceway de 7 m². Diariamente se ha medido el peso seco de los cultivos, se ha monitorizado la eficiencia fotosintética y se han realizado medidas de nutrientes. Se ha producido la biomasa suficiente para los análisis de composición y toxicidad.

Una vez seleccionada la salinidad óptima para la producción de *Ulva compressa* ($45 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), se ha escalado el cultivo a un raceway de 100 m^2 , evaluando la productividad de biomasa.



A2.5. Optimización de las condiciones de cultivo outdoor de las macroalgas en efluentes procedentes de cultivos de microalgas con vertidos de salmuera de desaladoras.

Por motivos de operatividad en el ITC nos fue imposible hacer una instalación que trasladara el efluente del cultivo de microalgas a la planta piloto donde se cultivan las macroalgas. El cultivo de las microalgas se realiza en reactores raceway y la instalación donde finalmente se implantó la planta piloto de las macroalgas está a más de 500 m de distancia. Por lo que esta experimentación fue llevada a cabo en condiciones indoor.

El efluente del cultivo de las microalgas se guardó, se filtró y se utilizó para cultivar *Ulva australis* en una cámara de cultivo indoor donde los parámetros de temperatura, fotoperiodo y radiación se pueden controlar para que se asemejen lo máximo posible a las condiciones ambientales.

La *Dunaliella salina* fue específicamente cultivada en fase verde puesto que es una fase en la que no agota todos los nutrientes que están disponibles en el medio y por tanto permite tener un efluente rico en nutrientes. El experimento fue llevado a cabo con 9 erlenmeyers de 1 L donde en tres de ellos el medio de cultivo era agua de mar (a modo de control) con la adición de los nutrientes que usamos para mantener el stock normalmente, en otros tres el medio de cultivo era el efluente de la *Dunaliella salina* cultivada en agua de mar y en los otros tres el medio de cultivo era el efluente de la *Dunaliella salina* cultivada en salmuera. Las tres condiciones fueron hechas por triplicado para que los datos y resultados pudieran ser reproducibles. Los efluentes del cultivo de las microalgas fueron filtrados para evitar que pequeños microorganismos pudieran contaminar el cultivo de las macroalgas. Esta experimentación tuvo lugar durante 22 días.



En la UAL se realizaron los ensayos de producción de *Tetraselmis* sp. y uso de su efluente para la producción de *Ulva compressa*, dando buenos resultados de productividad de biomasa, aunque inferiores que los realizados anteriormente con *Ulva compressa*, probablemente porque coincidió en invierno, donde el crecimiento es menor. Se observó que después del crecimiento de *Tetraselmis* sp. sobraban suficientes nutrientes para la producción de *Ulva*, no siendo por tanto, la concentración de nutrientes un limitante para la producción de *Ulva*.



d. Actividad A3:. Valorización de la biomasa y calidad alimentaria.

La actividad 3 consiste en el análisis del perfil nutricional, microbiológico y organoléptico de la biomasa producida para asegurar su seguridad y competitividad en el mercado alimentario, comparándola con estándares comerciales actuales.

- Análisis nutricional: Evaluación del perfil y seguridad alimentaria de la biomasa producida de macroalgas y microalgas.
- Estudio de mercado: estudio de mercado sobre la *Ulva* y sus productos derivados en la industria alimentaria.
- Comparativa industrial: análisis comparativo de la biomasa producida en el proyecto con biomasa que se está comercializando actualmente en el sector de la industria alimentaria.
- Encuestas poblacionales: Evaluación y análisis de la aceptación de las algas en la sociedad y en profesionales de la industria alimentaria.

En esta actividad se han desarrollado las siguientes acciones:

A3.1. Análisis de calidad de la biomasa de macroalgas producida en vertidos de salmuera.

Se han realizado análisis de la calidad alimentaria de las macroalgas que han sido seleccionadas y cultivadas outdoor: la *Ulva australis* en Gran Canaria y la *Ulva compressa* en Almería. El ITC debido a su proceso de obtención de la biomasa para su posterior análisis, el post-procesado de la biomasa se ha realizado de forma progresiva con cada cosechado, por lo que se ha ido obteniendo biomasa a las distintas salinidades en cada uno de los cosechados y posteriormente se ha procedido a secarla y a molerla.

La UAL, tras el cosechado, ha lavado la biomasa y la ha centrifugado para reducir el contenido hídrico externo al máximo. Posteriormente se ha utilizado un secadero solar diseñado por el grupo para secar la biomasa. Consiste en un tambor rotatorio alimentado por una corriente de aire caliente cuya energía térmica procede de colectores solares.



El ITC por su parte ha usado un desecador de la marca Bufalo con 10 bandejas de acero. Pero debido a las capacidades insuficientes de este equipamiento y a las altas cantidades de biomasa para procesar semanalmente, *Ulva* también ha sido secada en un desecador de calidad alimentaria con 5 bandejas de la marca SilverCrest. Todas las algas han sido procesadas en las mismas condiciones: secadas durante 24 horas a 45 °C y posteriormente molidas en un vaso de batidora de la marca Braun.

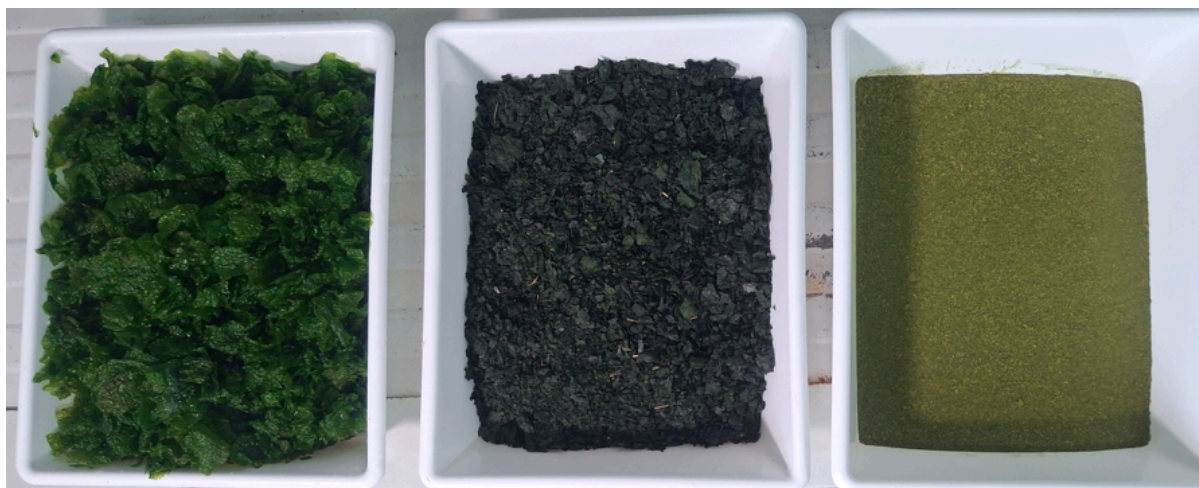


La biomasa para poder ser analizada tiene que estar molida y seca. La fracción seca de la *Ulva australis* que hemos producido en el ITC está en torno a un 0,19 lo que significa que de cada 1 kg de biomasa fresca que cosechamos se obtenían solo 190 g de peso seco aproximadamente. Por lo que la biomasa necesaria para la realización de los diferentes análisis se ha ido consiguiendo a lo largo del tiempo en los diferentes cosechados.

Se han realizado análisis nutricionales, análisis microbiológicos y análisis de metales pesados de las muestras producidas. En el análisis nutricional se ha realizado para conocer la composición química y el valor nutricional y se ha analizado la humedad, las grasas, las proteínas la fibra alimentaria, los hidratos de carbono, el almidón, el sodio, los azúcares, la sal y el perfil de ácidos grasos. En el análisis microbiológico se han evaluado las enterobacterias, mohos y levaduras, se ha hecho un recuento aerobios mesófilos en placa 30°C, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp., *Clostridium perfringens*, coliformes, *Escherichia coli* B-Glucuronidasa+ y *Estafilococos coagulasa* positivos. Este análisis se realiza para evaluar la seguridad, calidad higiénica y aptitud de tus macroalgas mediante la detección de patógenos relevantes.

En la biomasa de macroalgas, debido a que pueden acumular metales y para garantizar la seguridad, cumplir normativa también se ha efectuado análisis de metales pesados, donde se ha analizado el arsénico, cadmio, plomo, níquel, mercurio y yodo.

Por último, se han realizado ensayos de citotoxicidad mediante el MTT assay, un ensayo colorimétrico que mide la actividad metabólica mitocondrial como indicador indirecto de la supervivencia celular.



Los resultados de los análisis mostraron que el cultivo de *Ulva australis*, si se incrementa la salinidad (40-50 ups) la biomasa mejora su fracción proteica y lipídica como respuesta al estrés, reduciendo además su contenido de sodio. Sin embargo, estas condiciones extremas propician la acumulación de metales como níquel y cadmio, lo que obliga a optimizar el proceso para garantizar la seguridad alimentaria.

Por su parte, *Ulva compressa* mantiene un perfil nutricional bastante estable frente a los cambios de salinidad, destacando por ser rica en carbohidratos, con un contenido moderado de proteínas y bajo en lípidos. Al igual que ocurre con *U. australis*, el estrés salino induce ligeros aumentos en proteínas y lípidos. Adicionalmente, los ensayos de citotoxicidad confirman que esta biomasa es muy segura para su uso habitual, presentando efectos adversos únicamente ante concentraciones extremadamente elevadas.

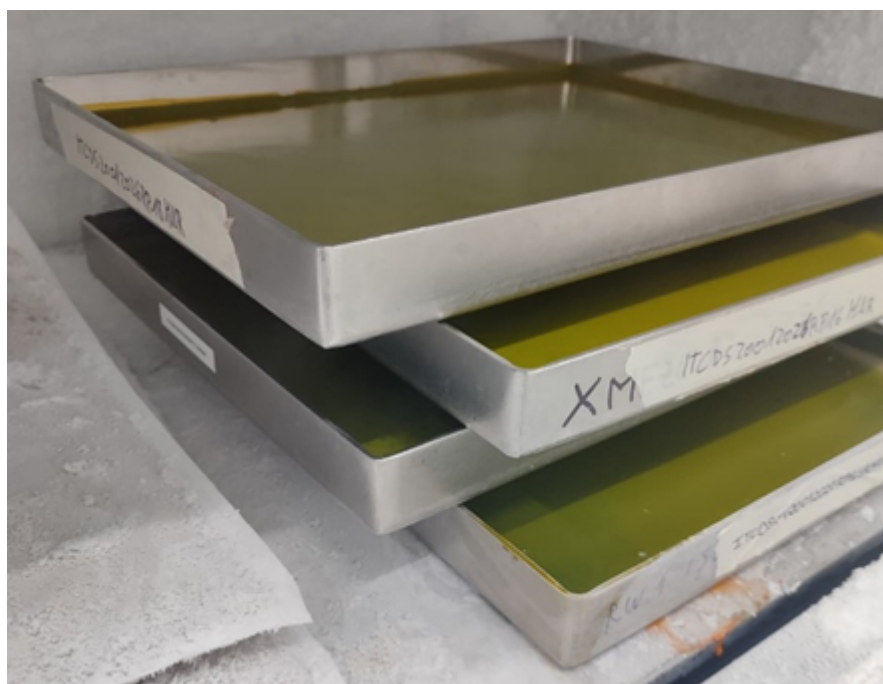
A pesar de estas ventajas nutricionales, la salinidad altera significativamente el perfil mineral de *U. compressa*, aumentando elementos como hierro, yodo y sodio, en detrimento del magnesio y potasio. El mayor riesgo de cultivar a altas salinidades es la acumulación de elementos traza y metales pesados (como cromo, níquel y arsénico). Por ello, se concluye que operar a salinidades intermedias o moderadas es la estrategia más adecuada para obtener biomasa destinada al consumo humano, logrando el mejor equilibrio entre calidad nutricional y seguridad toxicológica.

A3.2. Análisis de calidad de la biomasa de microalgas producida en vertidos de salmuera.

El ITC ha cultivado la cepa local de microalga *Dunaliella salina*, en reactores raceways de 250 L en condiciones outdoor. El cosechado de estos reactores una vez que se alcanzó suficiente biomasa para la realización de las analíticas (por encima de los $0,6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ porque esto es lo que nos asegura una concentración suficiente para la obtención de biomasa suficiente para que después analizar), se realizó mediante una centrífuga que permite separar los sólidos (las microalgas) del medio de cultivo. Los cultivos se cosecharon con una centrífuga Alfalaval modelo Clara 20 con capacidad de hasta 4000 L/h, volumen de descarga fijo de 1,1L y potencia de motor de 3,7kW.

La suspensión de algas obtenida tras la cosecha se congeló a -80°C en recipientes de acero inoxidable (espesor de biomasa = 0,02 m) y se liofilizó. La liofilización es un proceso de

deshidratación en el que el material se congela primero y posteriormente el agua se elimina por sublimación bajo condiciones de vacío, es decir, el hielo pasa directamente de sólido a vapor sin pasar por fase líquida, minimizando la degradación térmica y la oxidación de compuestos sensibles, lo que permite preservar mejor la estructura celular y moléculas bioactivas en comparación con métodos. La liofilización se llevó a cabo con un liofilizador Lyobeta® 6PL (temperatura mínima del condensador = $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$, capacidad máxima del condensador = 30 kg; Telstar, Barcelona, España) utilizando los siguientes parámetros: congelación a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 4 h, un secado primario en dos etapas a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 20 h y a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 20 h a una presión de cámara de 200 μbar , y un secado secundario final a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 5 h a una presión de 800 μbar . La biomasa se envasó en bolsas PETMet selladas al vacío y se almacenó en un ambiente oscuro y seco a $25 \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ para su posterior análisis.



En el caso de la UAL, la biomasa producida fue *Tetraselmis* sp. fue preconcentrada mediante membranas de ultrafiltración, reduciendo 10 veces su contenido en agua. Posteriormente se centrifugó hasta dejarlo 10 veces más concentrada, y se liofilizó.

Se realizaron los análisis de calidad nutricional y microbiológicos con los mismos parámetros que fueron analizados en la biomasa de las macroalgas.

Los resultados mostraron que el cultivo de *Dunaliella salina* en condiciones de alta salinidad (~ 70 ups) resulta produce una biomasa con un excelente perfil nutricional, destacando por su riqueza en ácidos grasos omega-3, ausencia de azúcares y su capacidad para regular los niveles de sodio, lo que la convierte en un ingrediente muy prometedor para el desarrollo de alimentos funcionales. En contraste, la biomasa obtenida de *Tetraselmis* sp. resulta inviable para el consumo humano debido a su alta acumulación de metales pesados, una limitación crítica que obliga a cultivar esta especie a salinidades más bajas o a implementar exhaustivos lavados post-cosecha para poder reducir su toxicidad.

A3.3. Estudio de mercado de la biomasa de macroalgas producida en vertidos de salmuera y de la biomasa producida con efluentes de cultivos de microalgas cultivadas en vertido de salmuera para la industria alimentaria.

Se ha realizado un estudio de mercado sobre las macroalgas del género *Ulva* sp. así como de sus productos derivados con un enfoque en la industria alimentaria. Este estudio ha consistido en analizar la oferta, la demanda y las tendencias comerciales asociadas a esta macroalga. Evalúa aspectos como los usos principales (alimentación, nutracéutica, cosmética, biofertilizantes), precios, competidores, canales de comercialización y perfil de consumidores, así como la viabilidad económica del producto. Su finalidad es identificar oportunidades de negocio, posicionar el producto en el mercado y apoyar la toma de decisiones estratégicas para su desarrollo y comercialización.

El estudio de mercado confirma que la biomasa de *Ulva* es una materia prima estratégica para la bioeconomía europea, ofreciendo una oportunidad clave para reducir la actual dependencia de las importaciones asiáticas, que hoy dominan el mercado. Su gran versatilidad permite integrarla en múltiples cadenas de valor, destacando su uso como "superalimento" en nutrición humana y como biofertilizante en la agricultura, siendo este último su motor de demanda más inmediato. Además, su aplicación se extiende a la alimentación animal, a la industria farmacéutica y cosmética por sus valiosos extractos bioactivos (ulvanos), y al sector de la biotecnología ambiental como biofiltro y base para biomateriales.

A nivel técnico-productivo, *Ulva* presenta un rendimiento excepcional que puede alcanzar hasta 40 toneladas de materia seca por hectárea y año, superando ampliamente a la mayoría de los cultivos terrestres. Sin embargo, la viabilidad económica del sistema no radica en la venta de la biomasa en bruto, cuyo precio es muy bajo (0,5–1 €/kg). El verdadero potencial reside en el procesado avanzado para la extracción de compuestos purificados, una transformación que ejerce un efecto multiplicador capaz de elevar el valor del producto final entre 10 y 50 veces, alcanzando precios superiores a los 200 €/kg.

En el caso de las microalgas, *Dunaliella salina* y *Tetraselmis chuii* alcanzan rentabilidades extraordinarias por sus aplicaciones terapéuticas y en la alta gastronomía. En este contexto, aunque Asia-Pacífico lidera la producción masiva, España se ha consolidado como un hub estratégico de innovación tecnológica; aprovechando su climatología privilegiada, empresas pioneras nacionales lideran el cultivo tecnificado y controlado, fortaleciendo la soberanía industrial europea.

A pesar de este prometedor panorama, el escalado masivo de la industria todavía se enfrenta a barreras críticas, principalmente la compleja normativa europea sobre *Novel Foods* (que ralentiza la comercialización de nuevas especies) y los altísimos costes energéticos asociados a los fotobiorreactores. Para asegurar su viabilidad económica futura, el sector debe evolucionar hacia modelos de biorrefinería integral. Esta estrategia permitirá amortizar los gastos operativos mediante la extracción simultánea de múltiples bio-compuestos de altísimo valor, maximizando así la rentabilidad de la biomasa bajo estrictos estándares de sostenibilidad ambiental.

Para evaluar de forma integral el potencial de las macroalgas (particularmente *Ulva* spp.) como ingrediente en el sistema alimentario, se diseñaron y ejecutaron dos encuestas complementarias a través de formularios digitales. La primera se dirigió al público general, contando con 220 participantes, con el objetivo de analizar la percepción social, el nivel de conocimiento previo, la disposición a incorporar estas algas en la dieta o en la alimentación animal, y las principales barreras de consumo. La segunda encuesta, de carácter exploratorio, se enfocó en 32 profesionales especializados del sector alimentario (tales como perfiles de I+D, restauración y docencia). Esta última sirvió para evaluar el potencial técnico del alga, identificando formatos de uso ideales, posibles aplicaciones culinarias, condiciones de mercado y barreras operativas para su adopción a nivel industrial.

Los resultados revelan que, aunque el público general posee un alto nivel de conocimiento sobre las macroalgas y valora muy positivamente sus beneficios nutricionales y ambientales, la "falta de costumbre" y la necesidad de mayor información científica siguen siendo las barreras principales para su consumo cotidiano. Por su parte, el sector profesional valora enormemente su perfil funcional, su sostenibilidad y su aporte de sabor umami, considerándola un ingrediente muy versátil para ensaladas, caldos y preparaciones vegetales. Sin embargo, los expertos señalan que la falta de un suministro estable, la ausencia de recetarios específicos y la incertidumbre sobre la aceptación final del cliente son sus mayores limitaciones operativas. En conclusión, el estudio determina que el principal reto para la penetración de las macroalgas en el mercado no es tecnológico, sino de comunicación, escalado y transferencia. Por ello, se sugiere que su introducción debe realizarse mediante una integración progresiva en productos que ya resulten familiares para el consumidor, lo que ayudará a consolidar su papel estratégico y sostenible dentro de la bioeconomía europea.

A3.4. Estudio comparativo entre biomasa de macroalgas producida en vertidos de salmuera y biomasa ya comercializada.

Se ha analizado la biomasa de macroalgas del mismo género del que hemos producido en nuestras instalaciones (*Ulva* sp.) cultivadas con salmuera en condiciones *outdoor*, con muestras procedentes de las principales empresas que comercializan esta macroalga en la industria alimentaria en nuestro país. Estas empresas son Porto-Muiños, quienes nos han cedido su biomasa voluntariamente ya que es empresa colaboradora del proyecto y han colaborado el mismo desde el inicio. Las otras empresas son ALGAMAR, Capitán Alga y Algas La Patrona. De la biomasa de estas empresas se han realizado los mismos análisis (nutricional, microbiológico y metales pesados) que hemos realizado a la biomasa producida por nosotros y se han comparado los resultados obtenidos.

El análisis comparativo de la macroalga *Ulva* spp. demuestra que el cultivo en condiciones controladas permite obtener una biomasa nutricionalmente superior y más homogénea que las muestras comerciales. Mientras que la biomasa silvestre presenta una gran variabilidad dependiente de su origen (lo que dificulta su estandarización industrial), la cultivada ofrece un perfil proximal equilibrado y un mejor balance de ácidos grasos poliinsaturados (omega-3

y omega-6). Además, ambas tipologías coinciden en su práctica ausencia de azúcares simples, basando su valor en polisacáridos estructurales, lo que las hace ideales como ingredientes para dietas de bajo índice glucémico.

En cuanto a la seguridad alimentaria de *Ulva spp.*, el cultivo controlado supone una clara ventaja al lograr niveles de sodio mucho más bajos y estables frente a las elevadas acumulaciones de las algas comerciales. Respecto a los metales pesados, aunque la biomasa comercial concentra más arsénico y plomo por la exposición a entornos naturales, las muestras cultivadas tienden a acumular selectivamente níquel y cadmio. Pese a ello, la producción controlada sigue siendo la mejor estrategia para obtener ingredientes seguros y saludables, requiriendo únicamente ajustes operativos para minimizar estos metales específicos.

Por su parte, el estudio integral de la microalga *Dunaliella salina* confirma la misma tendencia: la producción controlada mejora notablemente la calidad nutricional frente al producto comercial. La *Dunaliella* cultivada presenta una composición proximal altamente reproducible y destaca por un excelente perfil lipídico enriquecido en omega-3 y grasas poliinsaturadas, modulado de forma dirigida mediante el estrés salino. Al igual que en las macroalgas, su nulo aporte de azúcares simples consolida a esta microalga como un ingrediente funcional muy atractivo.

Finalmente, el control del entorno en el cultivo de *Dunaliella salina* permite gestionar eficazmente la retención de sal en la biomasa, logrando niveles más bajos y adecuados que los encontrados en muestras comerciales o en salmueras extremas.

Por tanto, se demuestra que las algas producidas supera ampliamente las limitaciones de la biomasa comercial, permitiendo diseñar a medida ingredientes seguros, homogéneos y con perfiles nutricionales optimizados que cumplen con las estrictas normativas europeas para nuevos alimentos funcionales.

A3.5. Estudio de mercado de la biomasa de microalgas producida en vertidos de salmuera para la industria.

Se ha llevado a cabo un análisis integral y estratégico del mercado global y nacional de las microalgas para evaluar su potencial industrial y comercial. Para situar a las especies producidas en este proyecto en un contexto competitivo, el estudio incluyó la comparación con especies líderes como *Spirulina* y *Chlorella*, que actualmente dominan el mercado en términos de volumen y consumo masivo. Esta comparativa permite entender mejor el posicionamiento de especies de nicho frente a las materias primas más consolidadas del sector.

Se ha analizado el crecimiento del mercado (que se espera que casi se duplique para 2034), la demanda de sectores como la alimentación y la cosmética, y sus principales retos, como los costes de producir en España o las estrictas leyes de la Unión Europea sobre nuevos alimentos. También se confirma que España es un lugar estratégico para este negocio por la gran cantidad de horas de sol que hay, lo que facilita el cultivo.

Los resultados confirman que el mercado de microalgas está en fase de expansión acelerada, con un crecimiento anual proyectado del 9,12% para este segmento. El estudio destaca que, frente a las especies de bajo coste, *Dunaliella salina* y *Tetraselmis* sp. se posicionan en el

escalón más alto de rentabilidad biotecnológica. Mientras que *Dunaliella* es valorada como una "biofactoría" de pigmentos premium (betacarotenos), *Tetraselmis* lidera la innovación en nutrición funcional y gastronomía gourmet gracias a su estatus legal en Europa.

Por tanto, el análisis valida la estrategia de producir estas especies en vertidos de salmuera, ya que su naturaleza halófila permite obtener biomasa de alta pureza con menores riesgos de contaminación. Dado que España posee condiciones de insolación óptimas para estos cultivos, los resultados sugieren que la producción debe orientarse hacia nichos de alto valor añadido (nutracéuticos y alimentación premium) para compensar los costes operativos y maximizar la rentabilidad del proyecto.

Con el objetivo de evaluar de forma integral el potencial de estas macroalgas como ingrediente en el sistema alimentario, se diseñaron y ejecutaron dos encuestas complementarias dirigidas a diferentes perfiles poblacionales. La primera encuesta se orientó a un público general, con el fin de analizar la percepción social, el nivel de conocimiento, la aceptación y las barreras asociadas al consumo de macroalgas, incorporando variables sociodemográficas como edad y género para identificar posibles patrones de comportamiento y segmentación del consumidor. Por su parte, la segunda encuesta se dirigió a un público especializado del sector alimentario (I+D, restauración, industria y formación), con el objetivo de evaluar el potencial de aplicación de *Ulva spp.* desde una perspectiva técnica, incluyendo aspectos como formatos de uso, aplicaciones culinarias, condiciones de mercado y barreras operativas. La combinación de ambas aproximaciones permite obtener una visión holística del ecosistema de adopción, integrando tanto la demanda (consumidor final) como la oferta (sector profesional).

e. Actividad A4: Análisis del Ciclo de vida e impacto socioeconómico.

Esta actividad consiste en la cuantificación del coste económico y técnico del cultivo empleado en el proyecto.

- Estudio tecnoeconómico: análisis que evalúa de forma conjunta los aspectos técnicos y económicos de los distintos sistemas de cultivo desarrollados en el proyecto para evaluar la viabilidad de llevarlo a cabo.
- Análisis del Ciclo de Vida (LCA): Cálculo energético y de huella ambiental del proceso de cultivo desarrollado en el proyecto.

En esta actividad se han desarrollado las siguientes acciones:

A4.1. Análisis del ciclo de vida y análisis socioeconómico de la biomasa de macroalgas producidas en vertidos de salmuera.

Para evaluar la viabilidad del cultivo se ha realizado un análisis tecnoeconómico de las macroalgas cultivadas con salmuera procedente de desaladoras en sistemas outdoor en los diferentes sistemas de cultivo empleados en el proyecto, tanto en circuito abierto, renovando 10 veces al día el volumen de los reactores, como en circuito cerrado, utilizando membranas de recirculación para limpiar y reutilizar el agua. Estos ensayos se han realizado en tanques aireados y en reactores tipo raceways. Tras evaluar los resultados se ha llegado a la

conclusión por la viabilidad económica y de recursos empleados que resulta más rentable y medioambientalmente sostenible realizar el cultivo en circuito cerrado, puesto que requiere menos demanda energética al no tener que bombear tanta agua como se hace en el circuito abierto. Respecto a la rentabilidad del tipo de reactor, se han obtenido costes ligeramente inferiores en la producción de *Ulva* en tanques aireados, ya que, a pesar del elevado consumo energético debido a la aireación que requieren, la productividad es suficientemente elevada como para reducir los costes por unidad de biomasa (kg).

Una vez evaluado los resultados de este análisis tecnoeconómico se ha procedido a realizar un análisis del ciclo de vida comparando la tecnología de tanque aireado con circuito abierto y raceway con circuito cerrado mediante uso de membranas de ultrafiltración para reutilizar el agua. El análisis de ciclo de vida comparativo muestra que la tecnología tipo raceway reduce de forma general los impactos ambientales frente al tanque aireado, principalmente por el menor uso de salmuera (al ser recirculada), bombeo (por usar menos salmueras) y energía de aireación (al utilizar palas para la agitación del cultivo). Sin embargo, este cambio desplaza las cargas ambientales hacia el posprocesamiento, especialmente al secado, que se convierte en el principal contribuyente por su alta demanda energética, además de incrementar notablemente el consumo de agua debido a la evaporación (que se repone con agua dulce). En términos globales (ReCiPe Endpoint H), el cultivo en tanque aireado con circuito abierto presenta mayores impactos en recursos, mientras que en raceways con circuito cerrado penaliza más en salud humana y ecosistemas, evidenciando un efecto de compensación entre ambas. En cualquier caso, el consumo energético sigue siendo el factor crítico común, por lo que su optimización resulta clave para mejorar la sostenibilidad del proceso.

Tras comparar los distintos sistemas y con los resultados obtenidos se ha redactado una publicación científica a la espera de seguir evaluando los resultados de manera más técnica para poder presentarla en una revista o congreso próximamente.

A4.2. Análisis del ciclo de vida y análisis socioeconómico de la biomasa de microalgas producidas en vertidos de salmuera.

En cuanto al análisis tecnoeconómico de la producción de microalgas cultivadas con salmuera en sistemas raceways, tanto *Tetraselmis* sp. como *Dunaliella salina*, se observa un mayor coste por kg de biomasa en las microalgas que en *Ulva*, debido principalmente a su menor productividad. Comparando ambas cepas, la producción de *Tetraselmis* sp. resulta más económica debido, igualmente, a que la productividad de dicha cepa es 3 veces mayor que la de *Dunaliella salina*. Los costes unitarios de producción de dichas especies cultivadas en salmueras en reactores raceways son: 8.78 €/kg para *Tetraselmis* sp. y 16.65 €/kg para *Dunaliella salina*.

Mediante el análisis de ciclo de vida se ha evaluado de forma integrada un sistema de producción de microalgas en reactores tipo raceway, basado en el uso de fertilizantes y acoplado a una etapa posterior de valorización del efluente en el cultivo de macroalgas. A partir del análisis de ciclo de vida (ACV), se ha constatado que el perfil ambiental del sistema está dominado fundamentalmente por el consumo energético, que representa la mayor contribución en categorías como cambio climático y uso de recursos fósiles. En particular, la agitación mediante paddlewheel, debido a su operación continua, constituye el principal

hotspot del sistema, seguida por la etapa de cosecha, especialmente la centrifugación. Este resultado pone de manifiesto que cualquier estrategia de mejora debe centrarse prioritariamente en la optimización energética de estas operaciones. Los resultados del estudio demuestran que la sostenibilidad ambiental de los sistemas de microalgas en raceway depende de la interacción de un número limitado de variables clave: el consumo energético, la productividad del cultivo, la gestión de nutrientes y el uso del agua. La combinación de alta productividad, uso de CO₂ industrial, optimización de la cosecha e integración con corrientes residuales constituye la configuración más favorable desde el punto de vista ambiental. Estos resultados proporcionan una base sólida para el diseño y escalado de sistemas de producción de microalgas más eficientes, confirmando el potencial de las biorrefinerías algales en cascada como solución avanzada para la valorización de recursos y la reducción de impactos ambientales.

f. Actividad A5: Comparativa de eficiencia de los sistemas de cultivo.

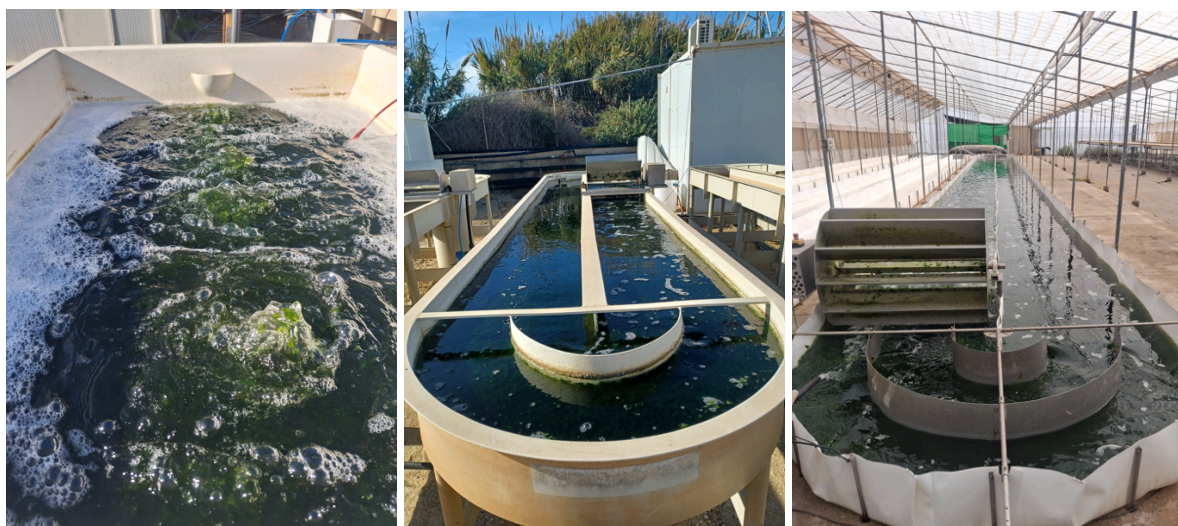
En esta actividad se realiza la comparación de los sistemas de cultivo empleados en el proyecto.

- Triple comparativa: Análisis entre sistemas de macroalgas en salmuera, microalgas en salmuera y macroalgas cultivadas en efluentes de microalgas cultivadas en salmuera.

A continuación se detallan las acciones realizadas en esta actividad:

A5.1. Estudio de la eficiencia de los sistemas de cultivo de macroalgas producidas en vertidos de salmuera.

Se ha realizado un estudio comparativo de las eficiencias de los reactores tipo tanque aireado, raceways de 7 m² y raceway piloto de 100 m² para *Ulva*.



La evaluación de los sistemas de cultivo confirma que la producción de *Ulva* en salmuera a 45 g·L⁻¹ es estable y permite alcanzar un estado estacionario en todos los sistemas. Si bien el tanque aireado destaca como el sistema que genera la mayor productividad de biomasa por unidad de superficie, su elevado consumo energético derivado de la agitación por aireación

encarece el precio unitario del producto final, limitando su viabilidad económica frente a otras alternativas.

Por otro lado, el escalado en sistemas piloto demuestra resultados positivos. El paso de un raceway de 7 m² a un raceway piloto de 100 m² no solo supuso un aumento en la productividad de biomasa, sino que logró la mayor eficiencia fotosintética de todos los sistemas ensayados, indicando una optimización en el funcionamiento general del cultivo al aumentar la superficie.

A5.2. Estudio comparativo de la eficiencia de los sistemas de cultivo de macroalgas producidas en vertidos de salmuera con las producidas en efluentes de cultivo de microalgas cultivadas en vertidos de salmuera.

El cultivo acoplado de microalgas y macroalgas se realizó en dos reactores raceway de 7 m². En uno de los raceway se cultivó la microalga *Tetraselmis* sp. alimentada con salmuera a 60 g·L⁻¹ de salinidad y con aporte diario de nutrientes. Diariamente un 20% del volumen del raceway de microalgas era filtrado a través de las membranas de ultrafiltración reteniendo la biomasa de microalgas en el tanque para su cosechado y llevando el medio de cultivo filtrado a otro raceway de 7 m² con cultivo de *Ulva* para reutilizar el agua y nutrientes que quedaban en el medio.



El sistema de producción acoplada de microalgas y *Ulva* resultó técnicamente estable y viable en régimen estacionario, ofreciendo productividades similares para ambas especies. Sin embargo, la disminución de la productividad de *Ulva* disminuyó a la mitad, lo que sugiere que el uso exclusivo de efluentes de *Tetraselmis* sp. puede no ser idóneo nutricionalmente o puede estar debido a que se realizó en una época del año más fría. Para optimizar este sistema acoplado, será necesario discriminar en futuros ensayos qué porcentaje de esta pérdida de rendimiento se debe a la calidad del efluente y qué proporción es consecuencia directa de la menor radiación solar y temperatura de los ensayos realizados durante el invierno.

A5.3. Estudio de la eficiencia de los sistemas de cultivo de microalgas producidas en vertidos de salmuera.

Las microalgas fueron cultivadas en reactores tipo raceway, puesto que, al tratarse de microalgas flageladas, tanto *Dunaliella salina* como *Tetraselmis* sp, no es conveniente su cultivo en reactores que utilicen bombeo, como son los reactores tubulares o thin layer, para no dañar la estructura celular. Por tanto, el estudio se ha hecho únicamente con una tecnología, los reactores tipo raceway, comparando la producción a dos salinidades, 40 y 70 g·L⁻¹.



Los resultados de los ensayos mostraron que el cultivo de microalgas (*Dunaliella salina*) obtienen mayores productividades a 40 g·L⁻¹ que a 70 g·L⁻¹, a pesar de obtener una menor eficiencia fotosintética, sin embargo, se observa una alta variabilidad en los diferentes ciclos de producción.

g. Actividad A6: Plan de viabilidad y transferencia tecnológica.

En esta actividad se evalúa el potencial de escalado nacional del proyecto.

- Estudio de viabilidad: análisis comparativo del cultivo de macroalgas y microalgas en salmuera, evaluando su desempeño técnico y económico en distintas regiones de España.
- Análisis regional: comparación de resultados entre Canarias y Almería para identificar diferencias en productividad, costes y condiciones operativas según la localización.

En esta actividad se han desarrollado las siguientes acciones:

A6.1. Comparativa de los datos obtenidos del cultivo de macroalgas en vertidos de salmuera de diferentes comunidades autónomas.

Se evaluó el cultivo de macroalgas en sistemas tipo tanque y raceway en las dos localizaciones del proyecto, Gran Canarias y Almería, demostrando que las condiciones

operativas y ambientales superan en importancia a la estructura del sistema. Por ejemplo, *Ulva australis*, cultivada en Gran Canaria en un circuito abierto, se benefició de la alta renovación del medio y la disponibilidad natural de carbono inorgánico. Esto se tradujo en una elevada eficiencia fotosintética (F_v/F_m) y un excelente estado fisiológico, aunque su productividad final de biomasa resultó ser más limitada.



En contraste, *Ulva compressa* fue cultivada en Almería utilizando un sistema *raceway* cerrado bajo condiciones de operación mucho más estrictas, incluyendo la inyección de CO_2 y el control del pH. Aunque esta especie mostró valores de eficiencia fotosintética más bajos que la producida en Gran Canarias, logró alcanzar productividades de biomasa significativamente superiores, evidenciando una mayor eficacia para convertir los recursos disponibles en crecimiento real.

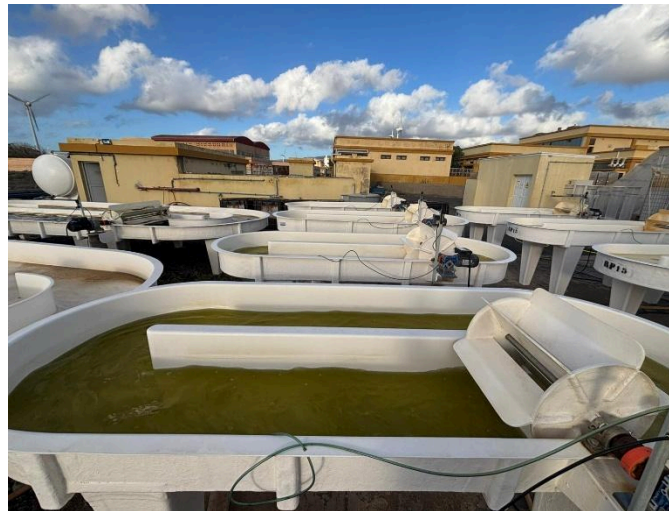


Estos resultados confirman que, en el cultivo de macroalgas, un buen estado fisiológico (alta eficiencia fotosintética) no garantiza por sí solo una alta producción de biomasa. Para maximizar verdaderamente el rendimiento, factores operativos como la hidrodinámica del sistema, la disponibilidad y control de nutrientes, la gestión del carbono inorgánico y la densidad poblacional del cultivo juegan un papel mucho más determinante.

A6.2. Comparativa de los datos obtenidos del cultivo de microalgas en vertidos de salmuera de diferentes comunidades autónomas.

También se realizó la comparativa de los cultivos de microalgas en sistemas tipo raceway en las dos localizaciones.

En Gran Canarias se cultivó *Dunaliella salina* en reactor raceway de 250 L utilizando salmueras a $40 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.



Mientras que en Almería se cultivó de *Tetraselmis* sp. en reactores raceway de 1.000 L con salmueras a $45 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$.



Los ensayos mostraron claras diferencias adaptativas entre especies frente a distintas estrategias de operación. *Tetraselmis* sp., cultivada en Almería en sistemas raceway con control automático de pH y suministro de CO_2 a una salinidad de 60 ups, mostró el mejor equilibrio. Esta especie logró combinar de manera simultánea una excelente eficiencia fotosintética con una alta productividad, indicando una adaptación óptima a condiciones ambientales altamente controladas.

Por su parte, *Dunaliella salina* se evaluó en Gran Canaria operando directamente sobre efluentes de desaladora con una salinidad de 70 ups y con un control de pH no continuo. Bajo este escenario, la microalga presentó una mayor variabilidad fotosintética y una producción de biomasa inferior. Esto se debe a su naturaleza extremófila, que la obliga a destinar la mayor parte de su energía metabólica a los mecanismos de tolerancia frente al estrés osmótico, priorizando su supervivencia frente a la división celular.

En definitiva, la comparativa de microalgas demuestra que mientras *Tetraselmis* sp. es la opción ideal para maximizar la producción de biomasa en sistemas optimizados y controlados, *Dunaliella* destaca por su resistencia. Así, en proyectos de valorización de salmueras, las especies extremófilas se posicionan como la alternativa estratégica clave y necesaria para poder aprovechar efluentes de salinidad extrema donde otros organismos, simplemente, no lograrían sobrevivir.

5. Conclusiones generales y valoración del proyecto

El proyecto ha demostrado que los entornos de vertido de salmueras no son espacios carentes de vida, sino nichos ecológicos que albergan una biodiversidad adaptada con un alto potencial biotecnológico. La combinación de técnicas de taxonomía clásica con ADN ambiental ha permitido catalogar con éxito especies de microalgas, cianobacterias y macroalgas capaces de prosperar en condiciones de hipersalinidad, destacando la presencia de cepas con una plasticidad fisiológica superior a la media.

La valoración técnica del proyecto es positiva, destacando la capacidad de respuesta del consorcio ante los obstáculos biológicos. La decisión estratégica de priorizar especies como *Ulva australis* y *Ulva compressa* ante la inestabilidad de otros taxones (como las cianobacterias) demuestra una gestión orientada a resultados y al rigor científico. Esta adaptabilidad ha permitido transicionar con éxito del laboratorio (*indoor*) a los ensayos de mayor escala (*outdoor*).

La ejecución del proyecto ha demostrado con éxito la viabilidad técnica de adaptar y escalar el cultivo de macroalgas como *Ulva australis* y *Ulva compressa*, así como de microalgas extremófilas como *Dunaliella salina* y *Tetraselmis* sp., utilizando salmuera procedente de plantas desaladoras. A través del diseño de infraestructuras específicas que incluyen tanques circulares, sistemas *raceway* al aire libre y entornos controlados en invernadero, se ha logrado validar la tecnología en entornos operativos reales. La optimización de variables críticas como la dosificación de nutrientes, el control del pH, el sombreado para evitar la fotoinhibición y la aclimatación gradual a la hipersalinidad ha permitido alcanzar un nivel de madurez tecnológica elevado, consolidando el uso de efluentes industriales como un medio de cultivo eficiente y sostenible.

Se ha validado experimentalmente que el uso de macroalgas (especialmente del género *Ulva*) y microalgas seleccionadas es una estrategia eficaz para la depuración de nutrientes en efluentes de desalación. El proyecto concluye que es posible alcanzar altas tasas de remoción

de nitrógeno y fósforo incluso en gradientes de salinidad de hasta 80 ups en el caso *Ulva*, siempre que se apliquen los protocolos de adaptación gradual desarrollados durante el proyecto. Esto posiciona a ALGASAL⁺ como una solución real para mitigar el impacto ambiental de las plantas desaladoras.

Los análisis bioquímicos realizados, particularmente con *Ulva australis*, confirman que el cultivo en salmuera no solo mantiene la calidad nutricional de la biomasa, sino que actúa como un estímulo para la síntesis de metabolitos de interés. El aumento observado en ciertos pigmentos y la estabilidad de los perfiles de ácidos grasos demuestran que la biomasa obtenida es un ingrediente seguro y valioso para la industria alimentaria y nutracéutica, cumpliendo con los estándares de la economía azul. En términos comparativos, la biomasa obtenida mediante este cultivo controlado resulta ser significativamente más homogénea, segura y nutricionalmente superior a las muestras recolectadas en el medio natural, las cuales presentan una variabilidad que dificulta su estandarización industrial.

El análisis de mercado y la valoración económica del proyecto indican que la competitividad de esta industria en Europa no reside en la comercialización de biomasa en bruto, sino en la adopción de un modelo de biorrefinería integral orientado a la obtención de extractos de alto valor añadido. Aunque existe un gran interés por parte de los sectores de la nutracéutica y la cosmética, el escalado masivo todavía se enfrenta a barreras críticas como la compleja regulación europea sobre *Novel Foods*, los altos costes energéticos y la necesidad de mejorar la comunicación hacia el consumidor final para superar la falta de hábito de consumo. En última instancia, la transición hacia una acuicultura tecnificada y controlada se perfila como la estrategia esencial para reducir la dependencia de las importaciones y fortalecer la soberanía industrial dentro del marco de la bioeconomía circular.

Como conclusión global, ALGASAL⁺ ha logrado establecer los fundamentos técnicos necesarios para la transferencia tecnológica al sector industrial. El proyecto no solo ha generado conocimiento científico de alto nivel, sino que ha diseñado una metodología operativa reproducible que permite a las empresas del sector de las algas y de la desalación colaborar en un modelo de simbiosis industrial, transformando un residuo en una fuente de riqueza y sostenibilidad ambiental.