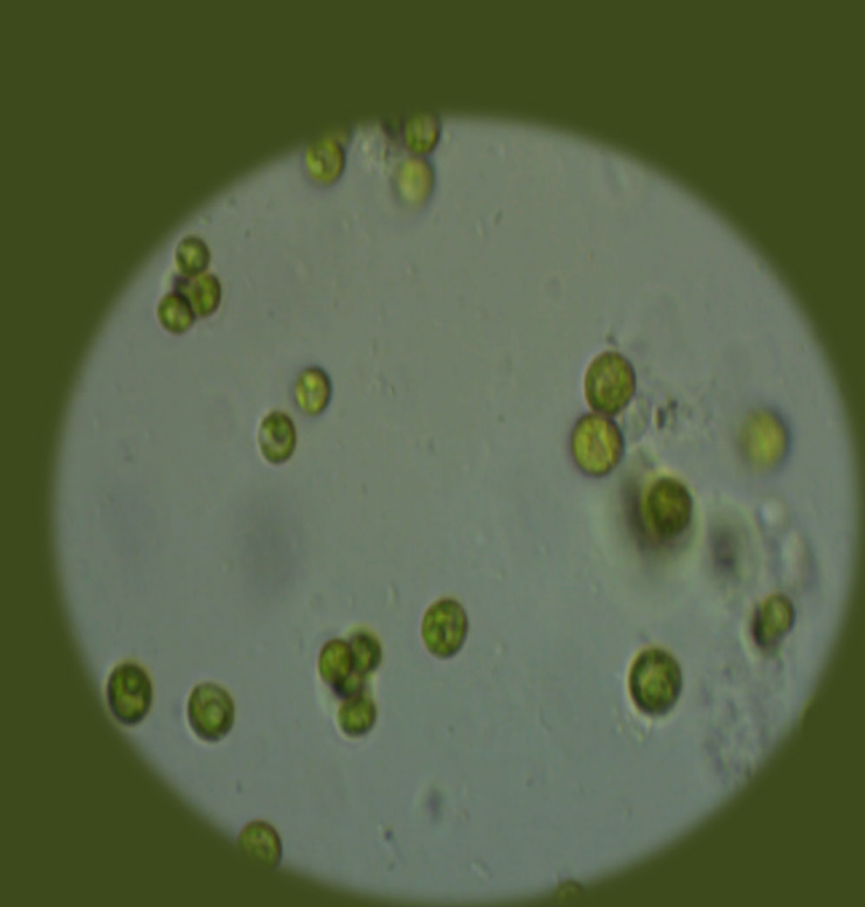




Biotecnología de Microalgas

Tratamiento Sostenible de Aguas Residuales Agroindustriales y Urbanas

Curso de Gestión Sostenible del Agua
Packs de Estancia - Orcera 2026

Dr. Fahd Mnasser

*Departamento. Ingeniería Química, Ambiental y de los Materiales |
Universidad de Jaén*

Contenidos

01

Introduccion y Contexto

Problematica de ARA y ARU

02

Las Dos Especies

*N. oleoabundans y Chlorella
protothecoides*

03

Metodologia

*Sistemas de cultivo y diseno
experimental*

04

Resultados

*Capacidad depuradora: nutrientes,
DQO, fenolicos*

05

Conclusiones

*Viabilidad normativa y perspectivas
futuras*

01

Introduccion y Contexto

Problematica ambiental de las aguas residuales agroindustriales y urbanas

El Sector Oleícola y sus Aguas Residuales

Contexto

- ▶ España: líder mundial en producción de aceite de oliva
- ▶ Jaén (Andalucía): >475.000 t producidas en campaña 2025–2026
- ▶ Sistema de 2 fases: genera grandes volúmenes de efluentes
- ▶ Producción concentrada entre octubre y marzo
- ▶ Muchas almazaras sin sistemas de depuración específicos

Problema central: Los efluentes se generan en grandes volúmenes en un período muy reducido, con alta carga orgánica y compuestos fenólicos tóxicos.

Tipos de Aguas Residuales de Almazara

Clasificación según Hodaifa et al. (2019)

ALA	Aguas de Lavado de Aceites pH: 4,92 Conductividad: 5,27 mS/cm DQO: 36.719 mg/L Compuestos fenólicos: 460 mg/L
ALF	Aguas de Lavado de Aceitunas pH: 6,53 Conductividad: 0,78 mS/cm DQO: 1.525 mg/L Compuestos fenólicos : 20,3 mg/L
ARA	Aguas Residuales de Almazara (ALA+ALF) pH: 5,35 Conductividad: 0,70 mS/cm DQO: 6.621 mg/L Compuestos fenólicos : 118 mg/L

⚠ Las ALA presentan la mayor carga contaminante, mientras que las ARA (mezcla) mantienen valores intermedios que requieren tratamiento previo antes de cualquier vertido.

Impactos Ambientales de las ARA

Aire



- * Liberación de gases de efecto invernadero como metano (CH_4).
- * Emisión de sulfuro de hidrógeno (H_2S) asociado a malos olores.
- * Formación de compuestos volátiles durante la degradación anaerobia.
- * Contaminación atmosférica en zonas próximas a las balsas abiertas.
- * Contribución al calentamiento global y al cambio climático.
- * Impacto negativo sobre la calidad del aire y el bienestar humano.

Agua



- * Elevada carga orgánica que reduce el oxígeno disuelto.
- * Procesos de eutrofización por exceso de nitrógeno y fósforo.
- * Formación de películas de aceites y lípidos en la superficie del agua.
- * Toxicidad asociada a compuestos fenólicos y contaminantes orgánicos.
- * Alteración de ecosistemas acuáticos y pérdida de biodiversidad.
 - * Mortalidad de peces y microorganismos por condiciones anaerobias.
- * Riesgo de contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

Suelo



- * Alta acidez y salinidad que degradan la calidad del suelo.
- * Acumulación de compuestos tóxicos y materia orgánica recalcitrante.
 - * Alteración de la microbiota beneficiosa del suelo.
 - * Reducción de la fertilidad y disponibilidad de nutrientes.
- * Disminución de la capacidad de retención de humedad.
- * Riesgo de erosión y deterioro de la estructura del suelo.
- * Impacto negativo sobre el crecimiento vegetal y la productividad agrícola.

Aguas Residuales Urbanas (ARU): Otro desafío ambiental

Características ARU	
DBO ₅	230 - 560 mg O ₂ /L
DQO	Hasta 1200 mg O ₂ /L
Nitrogeno	Concentración elevada
Fosforo	Concentración elevada
Materia organica	Biodegradable

Impactos sin tratamiento

Eutrofizacion

Exceso de N y P en masas de agua

Degradacion

Del suelo agricola

Riesgos sanitarios

Graves para poblaciones

Ecosistemas

Afectacion de fauna acuatica

ARA + ARU combinadas requieren soluciones de tratamiento eficientes y de bajo coste.

Las Microalgas como Solucion Biotechnologica

El cultivo de microalgas emerge como alternativa sostenible y de bajo coste operativo, especialmente en regiones mediterraneas con alta irradiacion solar.

Asimilacion de nutrientes

Las microalgas asimilan N, P y carbono organico de los efluentes para su propio crecimiento

Liberacion de oxigeno

La fotosintesis libera O_2 , favoreciendo la actividad bacteriana aerobia y reduciendo aireacion mecanica

Biomasa valorizable

Aplicaciones en biocombustibles, alimentacion animal, farmacia y agricultura

Bajo coste operativo

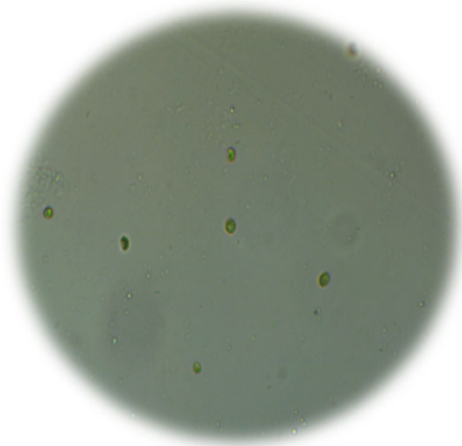
Especialmente ventajoso en regiones con alta irradiacion solar como Andalucía

02

Las Dos Especies Estudiadas

Neochloris oleoabundans y *Chlorella protothecoides*

Neochloris oleoabundans



Aplicaciones clave

- Biodiesel
- Biofertilizante
- Tratamiento aguas
- Nutraceutica

Microalga oleaginosa del phylum Chlorophyta

Morfologia

Elipsoidal pequena, unicelular, agua dulce y marina

Lipidos

Alto contenido lipidico en condiciones de estres

Crecimiento

Rapido, alta productividad en medios residuales

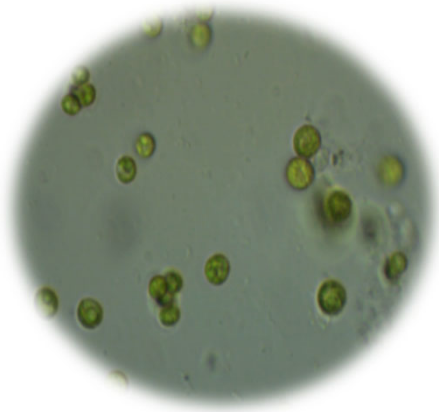
Metabolismo

Principalmente autotrofo fotosintetico

Por que N. oleoabundans para tratar ARA/ARU?

Su alta tasa de crecimiento y su capacidad de asimilar eficientemente nitrógeno y fósforo la convierten en candidata ideal para la biorremediación de efluentes agroindustriales y urbanos.

Chlorella protothecoides



Aplicaciones clave

- Biodiesel
- Biorremediación
- Tratamiento aguas
- Farmaceutica

Microalga verde con metabolismo mixotrofo excepcional

Morfología

Elipsoidal, unicelular, pared celular robusta

Metabolismo

MIXOTROFO: usa luz Y compuestos organicos como C

Lipidos

Alto contenido lipidico, apta para biodiesel

Ventaja clave

Degrada fenoles como fuente de carbono secundaria

Ventaja diferencial de C. protothecoides

Su metabolismo mixotrofo le permite usar simultaneamente la luz solar y los compuestos organicos (incluidos fenoles) como fuentes de energia y carbono. Es la mas eficiente eliminando fenoles, los contaminantes mas recalcitrantes de las ARA.

Comparativa de las Dos Especies

Característica	<i>N. oleoabundans</i>	<i>C. protothecoides</i>
Filo	Chlorophyta	Chlorophyta
Metabolismo	Autotrofo	Mixotrofo (clave)
Contenido lipidico	Muy alto	Alto (biodiesel)
Tolerancia a fenoles	Buena	Excelente (los usa como C)
Velocidad crecimiento	Muy alta	Alta
Mejor Eliminación de $\text{NO}_3^-/\text{NO}_2^-$	Buena	La mas alta del estudio
Mejor Eliminación DQO/CFT	La mas alta del estudio	Muy alta

03

Metodologia Experimental

Diseno de bioprocesos, sistemas de cultivo y medios residuales

Sistemas de Cultivo Utilizados

Agitador Orbital

Volumen:	Frascos Erlenmeyer 50 mL
pH:	7,0
Temperatura:	298 K (25C°)
Agitacion:	150 rpm
Iluminacion:	12,4 W/m ² (continua)
Inoculo inicial:	1,1 g/L

Fotobiorreactor con Tanque Agitado

Tipo:	Tanque agitado con luz
Control:	pH, T, CO ₂ , iluminacion
Ventaja:	Mayor disponibilidad de luz
Rendimiento:	Superior al agitador orbital
Total bioprocesos:	Más de 45 evaluados

Composicion de los Medios de Cultivo Residual

Cada bioproceso utilizo una mezcla diferente de efluentes, descritos segun la corriente predominante en su composicion.

ALA	Aguas de Lavado de Aceites <i>Alta DQO y fenolicos (hasta 36.719 mg/L)</i>
ALF	Aguas de Lavado de Aceitunas <i>Baja carga organica, pH neutro</i>
ARU	Aguas Residuales Urbanas <i>N, P y materia organica biodegradable</i>
R-L	Medio de cultivo Rodríguez-López <i>Medio nutritivo de referencia</i>

Los bioprocesos se describen segun la corriente predominante: por ejemplo, "predominancia ALA" o "predominancia ARU"

Diseno Experimental: Resumen General

45+

Bioprocesos individuales
evaluados en conjunto

1,1 g/L

Concentracion inicial
de inoculo

2 sistemas

Agitador orbital +
fotobiorreactor

Los bioprocesos exploraron distintos grados de predominancia de cada corriente residual:

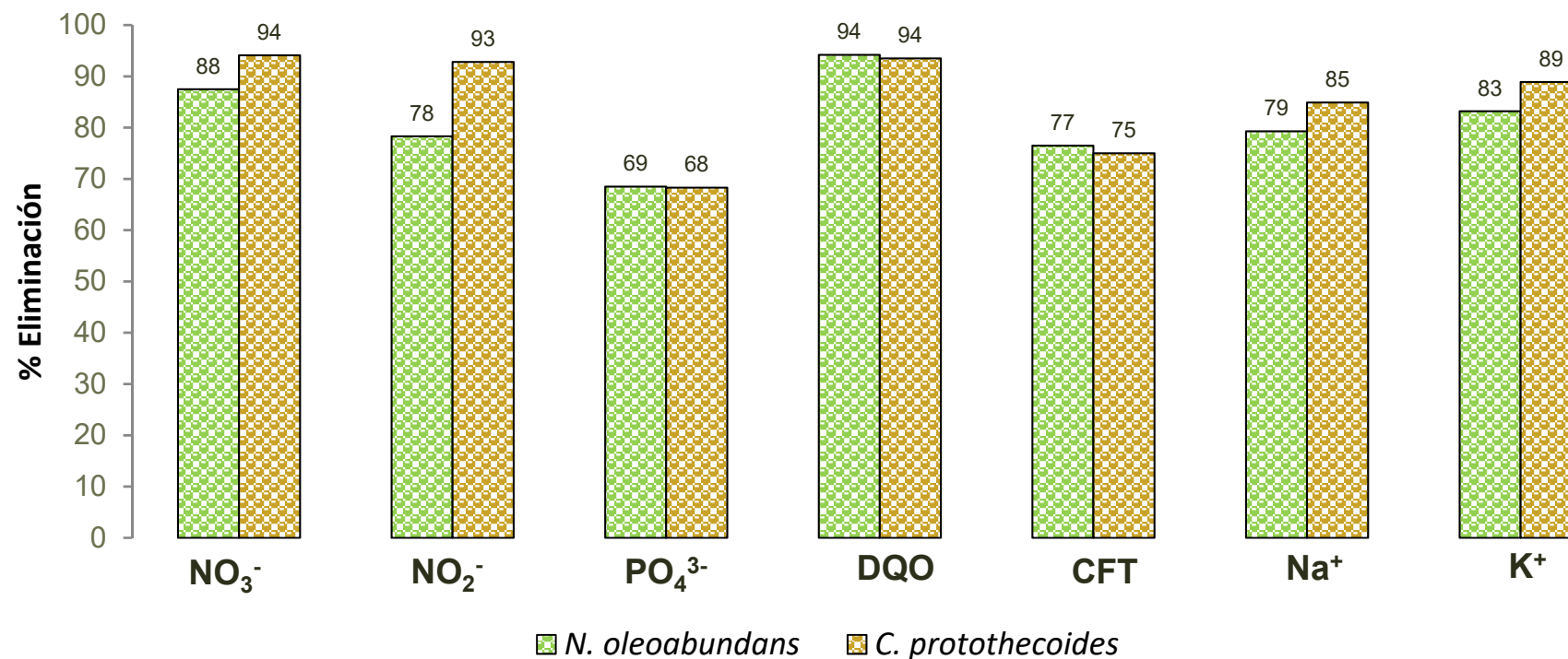
Predominancia ALA	Efluente de maxima carga organica y fenolica
Predominancia ALF	Efluente de baja carga, util como diluyente
Predominancia ARU	Combinacion con aguas urbanas de tratamiento secundario
Medio control (R-L)	Sin efluente residual, solo medio nutritivo de referencia

04

Resultados: Capacidad Depuradora

Resumen Global de Eficiencias de Eliminación

Tasas de eliminación máximas obtenidas en los bioprocesos con agitador orbital y fotobiorreactor



CFT = Compuestos Fenólicos Totales | Valores en %

Eliminacion de Nitratos (NO_3^-): >83% en Todos los Bioprocesos

La eliminacion de nitratos supero el 83% en la totalidad de los bioprocesos evaluados con ambas especies.

94,12%

C. protothecoides

87,50%

N. oleoabundans

Mecanismos de asimilacion de nitrogeno

Asimilacion directa

Incorporacion como fuente de N para proteinas y acidos nucleicos

Nitritos (NO_2^-)

C. protothecoides: 92,8% | *N. oleoabundans*: 78,3%

Eliminacion de Fosforo y Cationes Metalicos

68,5%

PO₄³⁻
N. oleoabundans

68,3%

PO₄³⁻
C. protothecoides

<30 mg/L

Limite FAO
(cumplido en TODOS)

Cationes metalicos eliminados

Ion	<i>N. oleoabundans</i>	<i>C. protothecoides</i>	Relevancia agricola
Na⁺	79,3%	84,9%	SAR < 13 protege estructura del suelo (FAO)
K⁺	83,2%	88,9%	Exceso compromete estructura del suelo (baja CIC)
Ca²⁺	-	86,6%	Evita precipitacion excesiva en el suelo
Cu²⁺	-	64,5%	Fitotoxico > 0,5 mg/L. Danino para cultivos

Reduccion de DQO: Cumplimiento de Normativa Espanola

Normativa espanola: DQO < 1 g O₂/L | pH 6-9 (Hodaifa et al., 2013)

94,2%

DQO max. *N. oleoabundans*
Fotobiorreactor

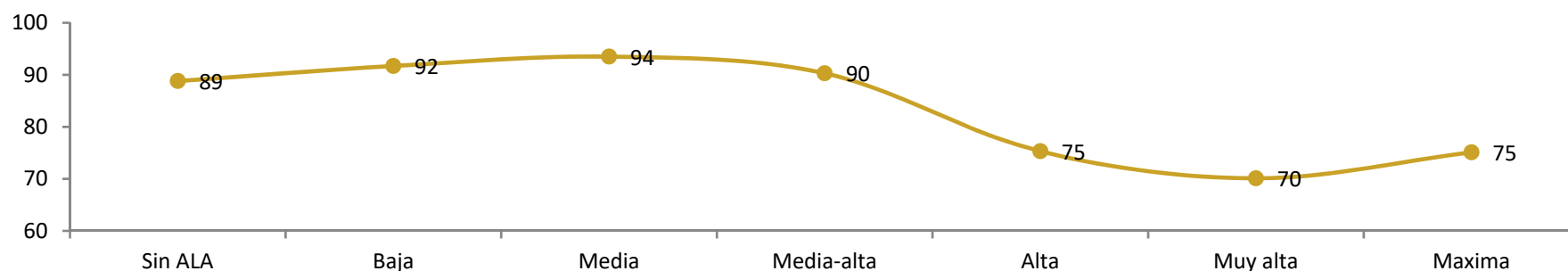
93,5%

DQO max. *C. protothecoides*
Fotobiorreactor

>87%

Reduccion en
multiples bioprocesos

Comportamiento en escenarios de predominancia ALA creciente (*C. protothecoides*):



Eje horizontal: predominancia creciente de ALA en el medio de cultivo

Eliminación de Compuestos Fenolicos (CFT)

Los fenoles son los contaminantes MAS recalcitrantes de las ARA, fitotoxicos incluso a concentraciones < 1 mg/L.

76,5%

N. oleoabundans

75,0%

C. protothecoides

Literatura previa
(Lindner and Pleissner, 2022)

**Maxima eliminacion documentada:
21%**

Este estudio

**Maxima eliminacion:
76,5% (mas de 3x mayor)**

Mecanismos: biosorcion en pared celular + degradacion enzimatica + metabolismo mixotrofo (C. protothecoides usa fenoles como fuente de C)

Tabla Resumen: Tasas Maximas de Eliminacion

Mejores resultados obtenidos en agitador orbital y fotobiorreactor para cada especie.

Parametro	<i>N. oleoabundans</i>	<i>C. protothecoides</i>	Limite normativo
NO₃⁻ (nitratos)	87,5%	94,1%	< 10 mg/L (Junta de Andalucía)
NO₂⁻ (nitritos)	78,3%	92,8%	Sin limite especifico
PO₄³⁻ (ortofosfatos)	68,5%	68,3%	< 30 mg/L (FAO)
DQO	94,2%	93,5%	< 1 g O ₂ /L (ES)
CFT (compuestos fenolicos totales)	76,5%	75,0%	< 1 mg/L (fitotox.)
Na⁺ (sodio)	79,3%	84,9%	SAR < 13 (FAO)
K⁺ (potasio)	83,2%	88,9%	Sin limite especifico

Fotobiorreactor vs. Agitador Orbital: Comparativa

El fotobiorreactor presenta en general mayor rendimiento depurador, especialmente para DQO y fenolicos.

Parametro	Agitador Orbital	Fotobiorreactor
Control de parametros	Basico (T, agitacion, luz)	Avanzado (pH, CO2, T, luz)
Disponibilidad de luz	Moderada	Alta (optimizada)
Rendimiento DQO	Bueno	Excelente (>87-94%)
Rendimiento CFT	Moderado	Superior
Coste operativo	Bajo	Moderado-alto
Recomendacion	Efluentes carga moderada	Efluentes alta predominancia ALA

Robustez del Sistema: *C. protothecoides* en Predominancia ALA

El escenario mas exigente: predominancia maxima de ALA (efluente de mayor carga organica)

25300 mg/L

DQO inicial
(predominancia ALA maxima)

6300 mg/L

DQO final
(despues del bioproceso)

75,1%

Reduccion DQO
incluso en escenario extremo

Resultado: aunque la DQO final no cumple aun la normativa, demuestra la alta tolerancia de *C. protothecoides* a efluentes extremos.

Interpretacion:

- Una etapa adicional de tratamiento (dilucion o combinacion con ARU) llevaria la DQO final dentro del limite normativo.
- *N. oleoabundans* mostro un comportamiento similar de robustez en condiciones de alta predominancia ALA.
- Ambas especies son robustas frente a variaciones extremas de la composicion del medio residual.
- La combinacion de ALA con ARU mejora significativamente los rendimientos de depuracion.

05

Conclusiones y Perspectivas

Viabilidad normativa, economía circular y futuro de la tecnología

Viabilidad para Reutilizacion Agricola del Agua Tratada

DQO	Limite: < 1 g O ₂ /L <i>Ref: Normativa espanola</i>	Cumple en mayoria
pH	Limite: 6 - 9 <i>Ref: Normativa espanola</i>	Ajuste natural por fotosintesis
PO₄₃-	Limite: < 30 mg/L <i>Ref: FAO (Ayers & Westcot)</i>	Cumple en TODOS
SAR (Na⁺)	Limite: < 13 <i>Ref: FAO</i>	Reduccion hasta 84,9%
Sólidos Suspendidos	Limite: < 500 mg/kg <i>Ref: Normativa espanola</i>	Generalmente cumple
CFT (fenolicos)	Limite: < 1 mg/L <i>Ref: Fitotoxicidad</i>	Requiere complemento

Marco Normativo Europeo: Directiva UE 2024/3019

Aprobada el 27 de noviembre de 2024 | Pacto Verde Europeo

Antes 2039

Tratamiento terciario obligatorio

Eliminación de nitrógeno y fósforo

Antes 2045

Tratamiento cuaternario

Eliminación de microcontaminantes para grandes instalaciones

Resultado

Microalgas como solución

Cubre simultáneamente ambos requisitos a bajo coste operativo

Conclusiones

1

Ambas especies demostraron alta eficiencia depuradora frente a ARA y ARU, con eliminación de nitratos superior al 83% en todos los bioprocesos.

2

C. protothecoides alcanzó la máxima eliminación de NO_3^- (94,12%) y NO_2^- (92,8%), destacando su metabolismo mixotrofo para degradar fenoles.

3

N. oleoabundans logró la mayor reducción de DQO (94,2%) y de CFT (76,5%) en fotobiorreactor.

4

La eliminación de CFT (75-76,5%) supera en más de tres veces los máximos previos de la literatura (21%, Lindner & Pleissner, 2022).

5

El fotobiorreactor mostró rendimiento superior al agitador orbital para DQO y fenólicos gracias al mejor control de parámetros.

6

La tecnología cumple criterios FAO y normativa española para reutilización agrícola, alineándose con la Directiva UE 2024/3019.

Perspectivas Futuras e Integracion en Almazaras y EDAR

01

Integracion en EDAR

Fotobiorreactores como etapa terciaria/cuaternaria en estaciones depuradoras, conforme a la Directiva UE 2024/3019.

02

Co-cultivos

Combinar *N. oleoabundans* y *C. protothecoides* para ampliar el espectro de contaminantes eliminados.

03

Valorizacion de biomasa

Extraccion en cascada: lipidos (biodiesel) -> proteinas -> digestion anaerobia. Economia circular completa.

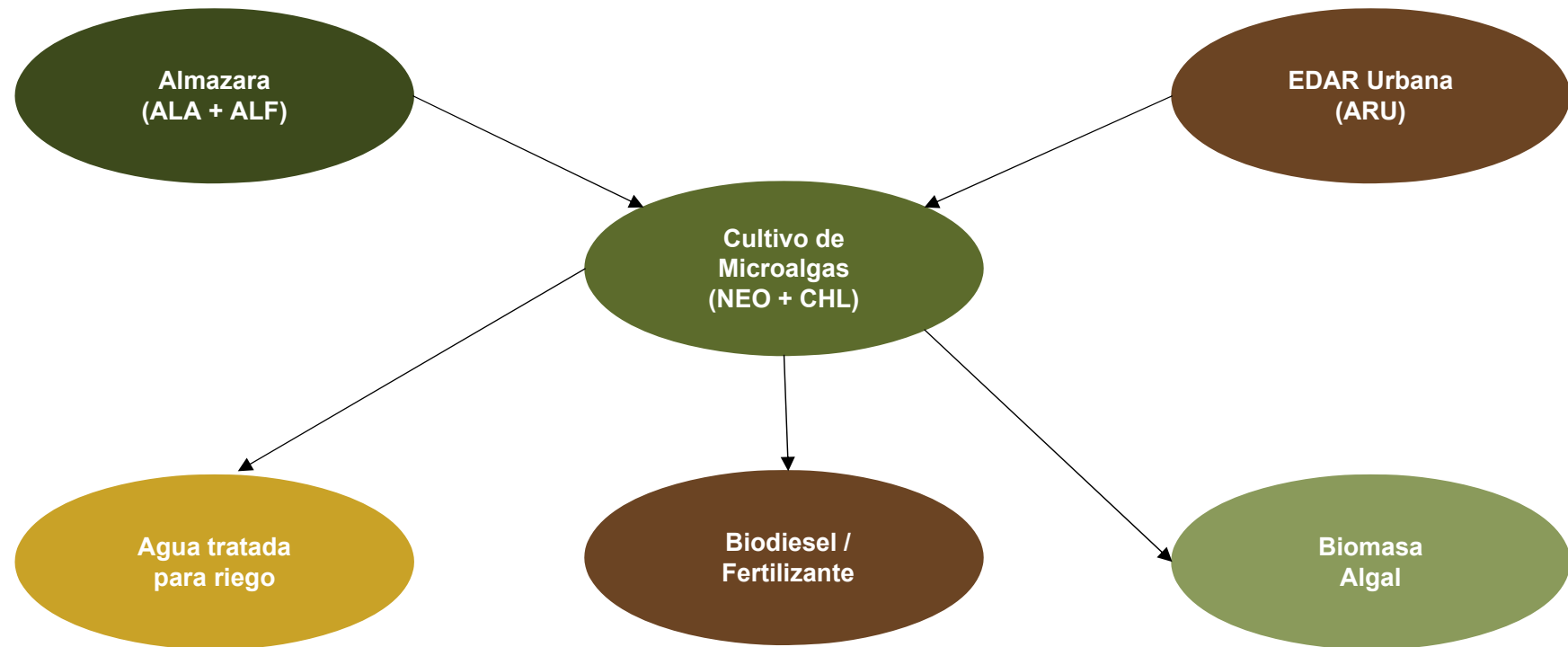
04

Escalado industrial

Fotobiorreactores a gran escala enalmazaras de Jaen/Andalucia, region con alta irradiacion solar.

Economía Circular: De Residuo a Recurso

Las microalgas transforman los efluentes agroindustriales y urbanos en recursos valiosos, cerrando el ciclo del agua y la biomasa.



Referencias Bibliograficas

1. Ayers, R.S., Westcot, D.W. (1985). Water quality for agriculture. Irrigation and drainage, FAO. 29, Rome.
2. Hodaifa, G., Sanchez, S., Martinez, M.E., Orpez, R. (2013). Biomass production of *Scenedesmus obliquus* from mixtures of urban and olive-oil mill wastewaters. *Appl. Energy*. 104, 345-352.
3. Hodaifa, G., Gallardo, P.A.R., Garcia, C.A., Kowalska, M., Seyedsalehi, M. (2019). Chemical oxidation methods for treatment of real industrial olive oil mill wastewater. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 97, 247-254.
4. Lindner, A.V., Pleissner, D. (2022). Removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by microalgae grown under dark and light conditions. *Waste Biomass Valor.* 13, 525-534.
5. Parlamento Europeo y Consejo de la Union Europea (2024). Directiva (UE) 2024/3019, de 27 de noviembre de 2024.
6. Pittman, J.K., Dean, A.P., Osundeko, O. (2011). The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. *Bioresour. Technol.* 102, 17-25.
7. Von Sperling, M. (2015). *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*. IWA Publishing, London.

**Gracias
por su
atención**