

Avaluació de les possibilitats del cultiu de microalgues sostenibles amb utilització de fonts d'energia renovables, estalvi d'aigua, etc., dirigits a la comercialització del producte amb ubicació preferent a la zona del Delta de l'Ebre. Benchmarking amb zones similars com França i altres zones de l'Estat

Elaborat per

Ioanis Katakis

Joan Salvadó Rovira

Desembre 2020

ÍNDEX

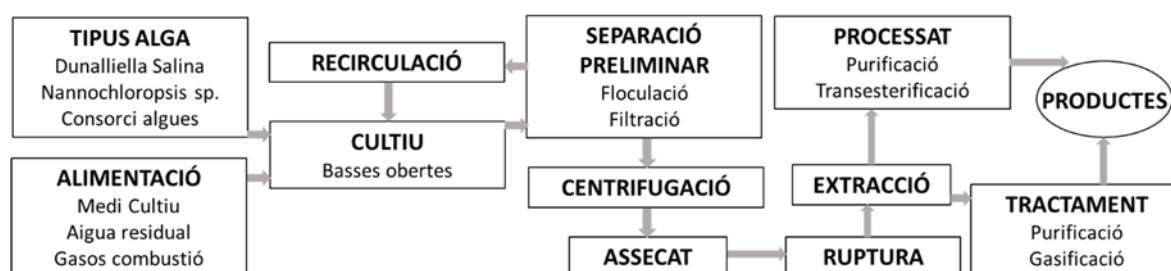
RESUM EXECUTIU	3- 4
I. Introducció	5-11
Abast d'estudi i estructura	
Microalgues: característiques i possibilitats	
Tecnologies de cultiu i producció	
Indicadors de sostenibilitat i criteris idoneïtat	
II. Benchmarking i estudi del mercat	11-16
Catalunya	
Estat Español	
Exemples Internacionals	
III. Models d'explotació	17-22
Biocombustibles	
Biorefineries integrades	
Economia circular	
IV. Solucions adaptades al territori	22-24
V. Conclusions i anàlisi de sensibilitat	25-27
ANNEX I	28

RESUM EXECUTIU

Es presenta un estudi sobre la possibilitat que cultius de microalgues en les Terres de l'Ebre puguin ser una alternativa sostenible de desenvolupament econòmic. En aquest context s'examina el concepte de la biorefineria basada en microalgues com un element més del sistema productiu de les Terres de l'Ebre. La biorefineria basada en microalgues permet la producció de diversos productes amb una petjada de carboni baixa o negativa aconseguint la producció de biomassa sense competició amb un sòl fèrtil o recursos hídrics. Les terres de l'Ebre presenten una idoneïtat mitjana per al desenvolupament de cultius de microalgues. Encara que és veritat que el benchmarking nacional i internacional mostra que les plantes amb més entitat (fins a 40 ha) estan instal·lades o s'instal·laran en breu en territoris amb idoneïtat alta, importants contribucions en l'estat de l'art es fan en països amb idoneïtat baixa. Aquestes són iniciatives de centres tecnològics o acadèmics que han conduït no obstant això a la creació de valor i la innovació.

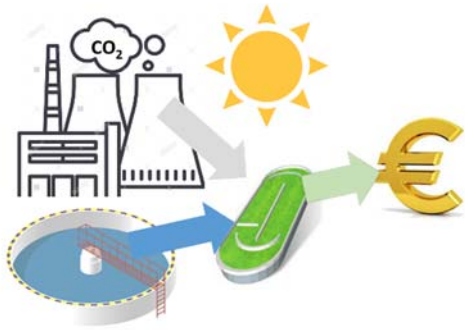
El sector és naixent i les empreses existents (fins i tot les més grans) no aprofiten el concepte de la "biorefineria integrada" que s'ha introduït com l'alternativa a l'economia de petroli. La recerca verifica que després del fracàs (des del punt de vista de sostenibilitat) de les biorefineries de primera generació (que van amenaçar la seguretat alimentària) s'ha posat gran interès en les biorefineries de la tercera generació (degut a que les microalgues no competeixen amb els cultius alimentaris per als recursos naturals). No obstant això, en comptes de "integració" les explotacions actuals se centren en monocultius "artesans" enfocant a la producció d'aliments funcionals i "nutracèutics". Aquest enfocament converteix el sector a precari perquè és difícil saber si la grandària del mercat per a aquests productes i els seus preus són sostenibles.

Aquesta situació no és d'estranyar: existeixen encara dificultats tecnològiques que no permeten la implementació a gran escala del concepte de la "biorefineria integrada d'algues". Per a ajudar a buscar vies d'implementació hem examinat tres "models" de biorefineria que es resumeixen en la següent "superestructura":



Hem simulat tres combinacions d'aquestes "operacions unitàries" i calculat parcialment alguns indicadors de cicle de vida que considerem útils. Hem usat només tecnologies amb una acceptable (6 o superior) TRL (*Technology Readiness Level* o proximitat a la implementació). Els nostres resultats verifiquen una observació consensuada en la bibliografia i en la pràctica: el primer model (que anomenem BC o "Biocombustible" en el qual es produeix només biocombustible) no és viable econòmicament. El segon model que incorpora a més la producció d'algun producte d'alt valor (usem com a "cas base" la producció de carotè) pot presentar un valor actual net amb amortització a 10 anys (VAN) positiu a partir d'una producció de 80 t per any de biomassa seca (uns 6,4 t de carotè que

correspon aproximadament al 2% de la demanda mundial anual) venent el carotè a 330 €/kg. Aquesta planta ocuparia unes 6 ha i la inversió inicial seria de € 12 milions. La rendibilitat depèn perillosament del preu del producte que es pot aconseguir en un mercat precari. El tercer model que anomenem el de "economia circular" (CE) es resumeix esquemàticament aquí i consisteix a usar aigües residuals com a alimentació i produir biogàs per co-digestió anaeròbia amb llots d'alguna EDAR. A més, l'alimentació de CO₂



procedeix del mateix procés de cogeneració en el qual s'usa el biogàs produït per a generar calor i electricitat. El model revela una instal·lació que no sols és essencialment d'emissions i petjada de carboni negatives, però també es pot escalar amb resultats econòmics positius a partir d'una producció de 18 t de biomassa per any (ocupant uns 1500 m²).

En la nostra opinió és aquesta tercera via l'única possible implementació sostenible i robusta i suggerim tecnologies de menys maduresa que podran integrar aquest model al territori en un futur pròxim.

Encara que aquesta es la orientació estratègica, dediquem una part d'aquest estudi per a examinar opcions de viabilitat de la producció "artesanal": a causa de la relativament fàcil entrada, aquest tipus d'explotació pot servir com una via de suplement dels ingressos de la població rural. No obstant això, algun esforç d'integració de massa crítica s'haurà de perseguir, potser seguint l'exemple de les cooperatives agrícoles.

La fiabilitat dels nostres resultats i conclusions són les esperades d'un estudi preliminar, sense càlcul rigorós i sense rebre ofertes de proveïdors. La nostra anàlisi de sensibilitat mostra que són particularment sensibles al preu del terreny, els preus de venda del producte i les dificultats tècniques en les unitats d'operació d'eliminació de l'aigua del cultiu.

III. INTRODUCCIÓ

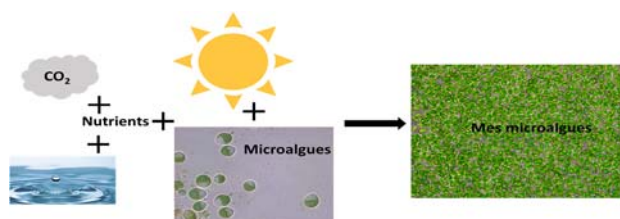
ABAST D'ESTUDI I ESTRUCTURA

S'han estudiat les alternatives d'establiment d'explotacions de microalgues en el territori del delta de l'Ebre (DE). L'elecció de les alternatives es basa en l'experiència nacional, estatal i altres exemples internacionals de territoris que presenten característiques socioeconòmiques i climatològiques similars. L'avaluació de les alternatives es duu a terme usant indicadors de sostenibilitat que tenen en compte en la mesura que sigui possible el cicle de vida de les possibles intervencions. Es proposen i s'examinen com a casos d'estudi tres models d'explotació: producció de biocombustibles (BC), biorefineries integrades (BI), i models d'economia circular (CE). L'estudi és orientatiu i per aquesta raó es presenta juntament amb l'avaluació dels resultats una anàlisi de sensibilitat que permet establir el grau de confiança a les conclusions.

L'estudi introdueix (apartat I), al nivell més divulgatiu possible, les microalgues, les raons d'interès en les mateixes i les possibilitats d'explotació. Es presenta l'esquema general del procés productiu comentant l'estat de la tècnica des del punt de vista de sostenibilitat usant indicadors que poden permetre calibrar els impactes socioeconòmics i ambientals amb èmfasi a la millora del territori. La informació sobre les experiències nacionals i internacionals (apartat II) s'ha aconseguit a través de la bibliografia, registres i entrevistes personals. A continuació (apartat III) aquestes experiències s'incorporen en l'anàlisi dels tres models estudiats i avaluats com a alternatives d'implementació (BC, BI i CE). L'anàlisi s'ha fet usant eines d'anàlisis de cicle de vida i bases de dades quan això fos possible i eines de simulació de processos. S'ha fet un estudi d'experiències similars i els resultats s'han contrastat per a assegurar coherència. A continuació s'ha fet un esforç per a adaptar els casos estudiats a les característiques del territori extretes de les bases de dades de la diputació de Tarragona (apartat IV). Les conclusions de l'estudi es presenten de manera informativa (i no afirmativa) juntament amb una anàlisi de sensibilitat en l'apartat V.

MICROALGUES: CARACTERÍSTIQUES I POSSIBILITATS

Les microalgues (MA) són microorganismes capaços de fer fotosíntesis: en aquest sentit són "plantes microscòpiques" que amb l'energia de la llum (en la naturalesa solar) són capaces d'usar el CO₂ atmosfèric per a créixer (en aquest cas multiplicar-se). Per a dur a terme aquest procés necessiten a més aigua i nutrients (com les plantes necessiten fertilitzants i reg). Les MA són per consegüent una "màquina" que produeix biomassa a partir de la llum solar i CO₂:



Esquema I.1

L'interès en les microalgues es va suscitar principalment perquè algunes espècies (existeixen més de 100 mil espècies de MA amb diferents propietats) acumulen lípids en percentatges (per pes sec) superiors que alguns cultius usats per a la producció de biodièsel: les MA van estar en el centre d'interès per al desenvolupament de “biorefineries de tercera generació” en el sentit que la seva producció no competeix amb la producció d'aliments i en teoria es pot realitzar sense l'ocupació de grans extensions de sòl útil per a l'agricultura. En manera d'exemple en la Taula I.1 es presenta una comparació del contingut d'olis convertibles en biodièsel d'algunes espècies de microalgues segons dades acceptades en general en la pràctica. Aquest concepte (la producció de biocombustibles usant la biomassa de MA) està en el centre del model de la biorefineria de biocombustibles d'algues (BC).

Taula I.1 Comparació de productivitat de microalgues en biodièsel*

Espècie de microalga	Contingut en olis (% per pes sec)
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20-51
<i>Chlorella protothecoides</i>	14-57
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	16-71
<i>Nannochloris sp.</i>	20-56
<i>Neochloris oleoabundans</i>	29-65
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	18-57
<i>Schizochytrium sp.</i>	50-77
<i>Skeletonema coastatum</i>	13-51

*El % de "oli" es converteix gairebé quantitativament en biodièsel. Per a tenir una perspectiva: amb aquest contingut, una ha coberta amb DT. produiria la mateixa quantitat de Biodièsel que 20 ha plantades amb palma africana. La informació prové de: Mata MT, Martins AA, Caetano SN. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010; 14: 217-232.

Encara que encara persisteixen models de negoci que es basen en BC, està generalment acceptat que la viabilitat econòmica de producció de biocombustibles a partir de MA és negativa o (com a mínim) perquè sigui positiva requereix una escala (que es tradueix en hectàrees de sòl) que no s'ha intentat implementar fins al moment. Per aquesta raó les recerques s'han orientat a la coproducció d'altres components d'alt valor afegit que es poden extreure de manera viable des de la biomassa. Aquests esforços es van veure recolzats en la realització de l'alt contingut de les MA en suplementos nutricionals de pinsos i alimentació humana, productes químics, o de cosmètica. Aquest concepte (la coproducció d'una àmplia gamma de productes usant la biomassa de MA) està en el centre del model de la biorefineria integrada (BI). La Taula I.2 resumeix alguns components rellevants de diferents espècies de microalgues (mes informació en el apartat II).

Taula I.2 Components d'alt valor afegit d'algunes espècies de microalgues

Alt valor afegit	Mitjà-alt valor afegit
Astaxantina, β carotè, omega-3 àcids grassos (nutracèutics), àcid al·gurònic, farmacèutics	Spirulina, Chlorella (nutracèutics com biomassa), agar, alginat

A part dels productes d'alt valor afegit, la variabilitat de la composició de les diferents espècies de microalgues permet plantejar diferents vies d'explotació. La Figura I.1 és un exemple d'aquesta variabilitat i en l'apartat II s'elabora més sobre les possibilitats.

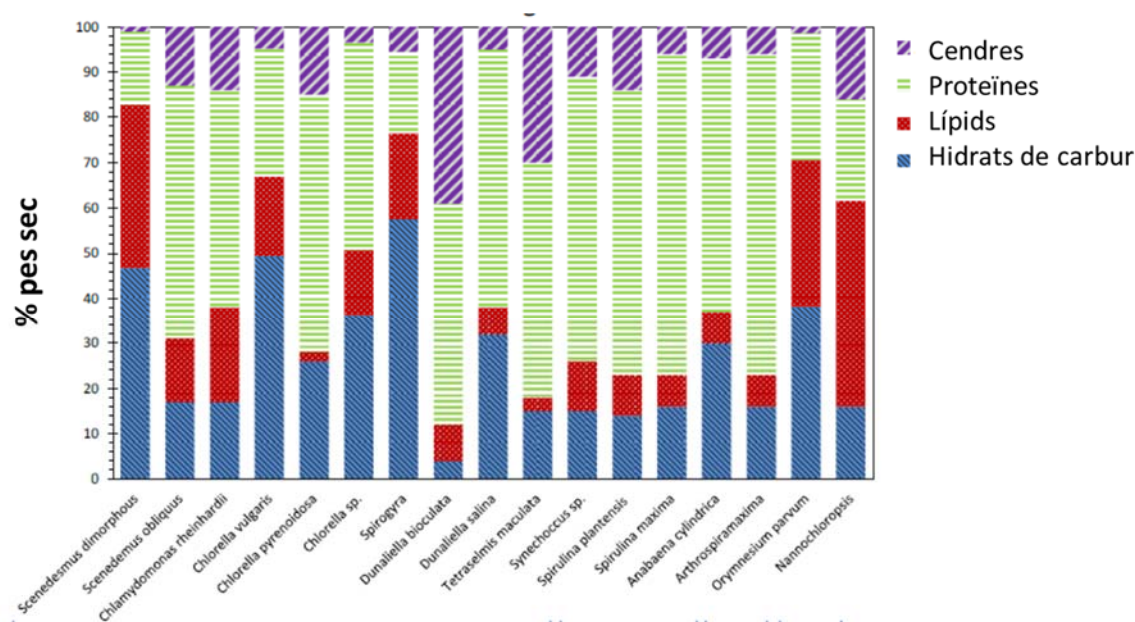


Figura I.1 Composició d'algunes espècies de microalgues (Adaptat de: *The Microalgae/Biomass Industry in Japan*, M. Herrador, Tokyo 2016)

La proposició sembla atractiva perquè indica que usant una llacuna d'aigua exposada al sol, es pot produir combustible i una sèrie d'altres productes consumint a més el CO₂ (un gas que condueix a l'escalfament global). No obstant això, l'observació de l'esquema I.1 fa obvi que a més de l'aigua, el sol i el CO₂, les MA necessiten nutrients. Aquests nutrients són similars als fertilitzants usats per les plantes i comporten els mateixos problemes (entre ells alts costos i eutrofització). Per aquesta raó s'està investigant l'ús d'aigües residuals com a "alimentació" de cultius de MA.

Taula I.3 Ús de diferents tipus d'aigua residual com a alimentació de cultius de microalgues*

Tipus microalgues	Tipus residu	País
<i>Synechocystis</i> sp. PCC 6803	Aigua residual granja gambes	Tailàndia
<i>Cyanobacteria</i>	Residus agraris	Espanya
<i>S. platensis</i> i consorci microalgues	Aigua tractament secundari	Qatar
<i>Chlorella</i> , <i>Cryptomonas</i> , <i>Scenedesmus</i>	Aigua residual urbana	Alabama, EUA
<i>C. sorokiniana</i>	Aigua residual urbana i de explotacions porcines	Brasil
<i>C. minutissima</i>	Aigua expl. porcines	Espanya
<i>H. rubescens</i>	Aigua residual	Alemanya
<i>S. obliquus</i>	efluents cerveseria	Portugal

*Adaptat de: Hu Xiaogang, et al, *Biomass Conv. Bioref.* doi.org/10.1007/s13399-020-01061-w (2020)

Actualment, està acceptat que gran part dels nutrients necessaris per al creixement de MA es pot proveir a través de diferents residus i en aquest sentit emergeix la possibilitat d'usar processos que empenen MA com a pivot de parcs ecològics industrials i com a element central d'un nou model d'economia circular. Aquest concepte (l'ús de MA no sols per a la producció de productes d'alt valor afegit sinó també per al tractament de residus) el denominem aquí el model de l'economia circular (CE). La Taula I.3 resumeix alguns informes que mostren la possibilitat de cultiu de microalgues amb alimentació composta per diferents tipus de residus.

Amb el que s'ha dit fins ara, sembla que l'ús d'algues en qualsevol dels models seria un procés sostenible econòmicament i mediambientalment. Tanmateix, això no és sempre així. Les raons es poden apreciar si es coneix millor la tecnologia del cultiu i les operacions unitàries del procés de producció.

TECNOLOGIES DE CULTIU I PRODUCCIÓ

Els cultius de microalgues es realitzen en reactors que poden ser oberts o tancats. Els oberts (OP) són essencialment basses de poca profunditat (fins a 30 cm) per a permetre la penetració de llum. Poden ser agitadaes o no i de diferents geometries i tipus de construcció. Els principals inconvenients de les basses obertes és l'alta possibilitat de contaminació i en general el pobre control de les condicions de cultiu. Malgrat això, són de fàcil construcció amb baixa inversió inicial. El seu manteniment i control són un repte que es fa més fàcil amb l'ús de cobertes de tipus hivernacle. Els reactors tancats (fotobioreactors o PBR) són de diverses geometries i maneres d'operació; els de més baix cost semblen com a bosses de plàstic amb rudimentaris sistemes de recirculació encara que els més robustos són cilíndrics o rectangulars agitadaes amb injecció de bombolles (*airlift*). Els PBR eviten l'evaporació i els problemes de contaminació i permeten millor control de l'operació a canvi d'una major inversió inicial. La productivitat varia segons l'espècie de MA però en general és més alta en els sistemes tancats (els PBR es poden instal·lar verticalment però a causa de les limitacions físiques (accés de la llum, suport mecànic) hi ha un màxim de volum que es pot instal·lar per superfície de sòl i la productivitat s'expressa en grams de biomassa seca per metre quadrat i dia o $gdw\ m^{-2}d^{-1}$) podent arribar fins a $50\ gdw\ m^{-2}d^{-1}$. Aquesta productivitat és 10-100 vegades superior de la de sòls més fèrtils del planeta (en carbó equivalent produït per metre quadrat). La Figura I.2 compara algunes de les productivitats més altes d'instal·lacions de capacitat com a mínim de planta pilot com a funció de tipus de reactor.

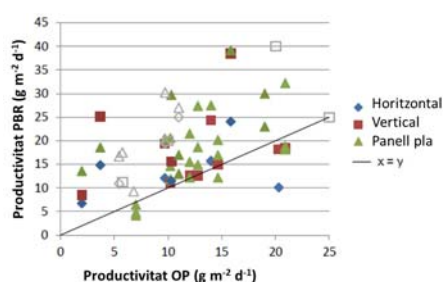


Figura I.2 Comparació de productivitat de seleccionats cultius de microalgues segons el tipus de reactor (adaptat de Technical Report NREL/TP-5100-72716, September 2019)

Encara que la productivitat per superfície d'explotació és un indicador útil per a avaluar la viabilitat dels cultius, és la concentració final de biomassa en el cultiu la que condiciona la resta de les operacions unitàries del procés productiu. Aquestes operacions unitàries es resumeixen en la Figura I.3 i tenen com a objectiu augmentar la concentració de sòlids (els productes) i separar els productes de valor. El cost d'aquestes operacions pot ser prohibitiu per a la viabilitat de l'explotació: la concentració típica de MA en la sortida del reactor és entre 1 i 5 g L⁻¹ (0,1-0,5%) i per consegüent és necessari eliminar del ordre de mil vegades més aigua que producte que es pot aïllar.

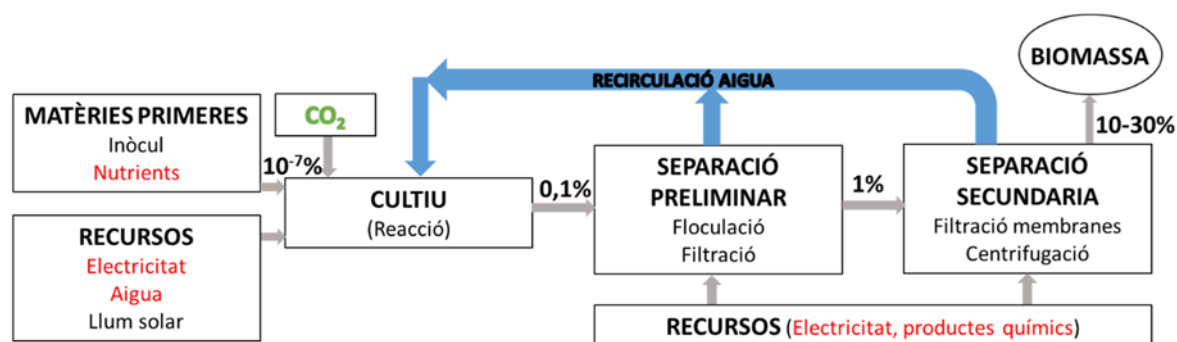


Figura I.3 Diagrama de blocs del procés de producció de microalgues. Els % indiquen la concentració (en pes sec) de biomassa, els colors efectes negatius (vermell) o positius (verda) al cicle de vida del producte

La descripció d'aquestes operacions unitàries permet formar una idea de la seva complexitat i alternatives d'implementació.

La separació preliminar consisteix en floculació amb l'ajuda de productes químics (floculants) o flotació depenent de la densitat de les algues. Algunes espècies s'agreguen de manera natural però en general és necessària una operació de sedimentació i decantació. En aquesta part del procés es poden afegir filtres que permeten l'eliminació gairebé total de les algues en l'aigua reciclada. Encara que sembla en el diagrama que tota l'aigua es recicla, en la pràctica part de l'aigua s'ha de purgar per a eliminar l'acumulació de metabòlits tòxics. Aquest tractament afegeix costos i impacte al cicle de vida de la biomassa.

La separació secundària o deshidratació (eliminació d'aigua): es pot aconseguir per filtració amb membranes o centrifugació en els casos que l'obstrucció dels filtres ho obliga. Després d'aquesta operació el contingut de sòlids és entre 10 i 30%. Per exemple s'ha eliminat més del 90% del volum del cultiu. La resta de les operacions unitàries depèn de l'objectiu de l'explotació: si el producte final és la mateixa alga, es procedeix a assecat i esterilitzar el producte però si es busquen els components bioquímics de la cèl·lula (per exemple lípids, àcids grassos, proteïnes, carbohidrats, vitamines, etc.) és necessària el trencament de la paret cel·lular, l'extracció de les fraccions objectiu i possiblement la purificació del producte final amb operacions especialitzades (filtració i d'altres). En alguns casos (com per exemple en la producció de biodièsel) és necessari sotmetre la fracció aïllada a un processament addicional (transesterificació normalment afegint metanol) per a produir el producte final. En aquest cas es produeix també glicerol en una proporció del 10% de biomassa seca. En

tots el casos es necessari afegir energia i altres recursos. En la Taula I.5 es resumeixen els productes més habituals que es persegueixen en biorefineries integrades.

Taula I.5 Possibles productes finals de biorefineries integrades de microalgues

Component MA	% (pp)	Producte final	Processat
Àcids grassos (AG)	10-45	Hidrocarburs/combustibles	Extracció/transect.
Omega-3	3-6	Poliols, poliuretà, Nutracèutics	Extracció
A.G. hidroxilats	~1	Surfactants, additius comb.	Extracció
A.G. ramificats	~1	Surfactants, additius comb.	Extracció
Alcohols grassos	~1	Surfactants, additius comb.	Extracció
Fitol	3-4	Vitamina E, fragàncies	Extracció
Lípids polars	10-35	Etanolamina, lecitina	Extracció/reacció
Glicerol	2-6	Nylon, farmacèutics	Extracció/reacció
Sucres fermentables	10-45	Polímers, etanol, diàcids	Extracció/ferment.
Manitol	3-6	Polièter, poliols	Extracció/fraccion.
Alginat	3-5	Additius	Extracció
Proteïnes	19-40	Termoplàstics	Extracció/reacció
Midó	5-40	Bioplàstics	Extracció/reacció
Aminoàcids	19-20	Poliuretà, butanol	Extracció/ferment.
Carotenoids	5-12	Nutracèutics	Extracció

INDICADORS DE SOSTENIBILITAT I CRITERIS IDONEÏTAT

Encara que l'objectiu d'aquest estudi no és establir la idoneïtat geogràfica o quantificar de manera rigorosa el potencial del mateix enfront d'uns altres, s'han establert alguns criteris i indicadors que permeten situar possibles models d'explotació en una escala de sostenibilitat majoritàriament acceptada en les anàlisis internacionals. Aquests tenen com a objectiu la claredat i la utilitat per a guiar a les administracions i els possibles inversors. En tots els casos es va intentar oferir el rang de valors dels mateixos obtinguts amb la recerca bibliogràfica. Al seu conjunt es poden usar per a decidir la sostenibilitat dels models proposats.

La radiació solar i la intensitat lumínica que es pot aconseguir en el territori són importants perquè segons l'esquema I.1 la llum és necessària per al creixement de microalgues. Dit això, cal destacar que l'efecte de la llum a la velocitat de creixement depèn de l'espècie triada, sent possible la inhibició del creixement en molts casos. Com es discutirà en l'apartat III, alguns dels models proposats es basen al creixement mixotròfic de les microalgues en el qual és necessària la modulació de la intensitat lumínica. Cal destacar que la distribució temporal i espacial de la intensitat lumínica (radiació activa per a la fotosíntesi o PAR) és un important criteri de disseny dels reactors de microalgues i en general ha de tenir valors entre 10 i 30 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. La radiació solar en el territori varia entre 70 i 270 W m^{-2} durant l'any que correspon a PAR entre 320 i 1240 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Encara que en alguns treballs s'ha vist que algunes espècies milloren la seva productivitat en cultius OP fins a PAR equivalent a 300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, la radiació solar en el territori es considera suficient per al manteniment de la majoria dels cultius de microalgues almenys entre març i octubre. Els territoris més

pròxims a l'equador reben una radiació solar superior als 300 W m^{-2} amb una distribució anual més estable.

La temperatura òptima de creixement de cultius de microalgues és entre 25 i $35 \text{ }^\circ\text{C}$ encara que també és funció de les espècies. En el territori la temperatura varia entre $5-15 \text{ }^\circ\text{C}$ en els mesos més freds i $20-32 \text{ }^\circ\text{C}$ els mesos de l'estiu. Les dades indiquen que amb simples mesures de gestió de la calor (sobretot si les instal·lacions disposen d'estructures similars a les d'hivernacles) es poden operar explotacions sense necessitat de climatització entre maig i octubre.

Els recursos hídrics són importants per a poder quantificar l'efecte d'explotacions de microalgues sobre aquests encara que algunes espècies toleren bé la salinitat i es pot utilitzar l'aigua de mar.

La distribució i capacitat de les EDAR en el territori són importants per a l'avaluació de sostenibilitat del model CE d'explotació estudiat a l'apartat III.

Les fonts estacionàries d'emissió de CO_2 , la seva capacitat i la seva distribució en el territori permeten examinar la viabilitat d'alguns models d'explotació. La concentració de CO_2 és important per al creixement de microalgues encara que també en aquest cas el seu efecte depèn de l'espècie usada. Per a la majoria de les espècies la concentració de CO_2 que s'aconsegueix en les configuracions OP amb mínima agitació és suficient per a aconseguir productivitat acceptable.

Per al càlcul dels indicadors tecno-econòmics i de sostenibilitat, inclosos els indicadors de cicle de vida, s'ha usat com a unitat funcional el kg de biomassa seca. Això és així perquè els diferents models d'explotació requereixen diferents operacions unitàries i processos per a extreure els productes finals. La unitat es va mantenir fins i tot per als casos que no és necessari l'assecat de la biomassa. Els indicadors utilitzats són:

El potencial d'eutrofització (FEP, en kg-eq de P) causat per al aigua residual.

L'energia necessària (en MWh) segons els balanços d'energia del procés (veure Figura I.3).

El potencial d'escalfament global (GWP, en kg-eq CO_2) incorporat en els recursos usats.

L'ús del sòl (en ha) per al creixement del cultiu (sense comptar instal·lacions auxiliars).

La inversió inicial (en milions €) calculada usant fonts bibliogràfiques, ofertes i factors d'escalat habituals en la pràctica de disseny d'instal·lacions químiques.

Les despeses d'operació (en milions €) calculada usant fonts bibliogràfiques, balanços de matèria y energia i factors d'escalat habituals en la pràctica de disseny d'instal·lacions químiques.

II. BENCHMARKING I ESTUDI DEL MERCAT

Creiem que la producció mundial de microalgues és de l'ordre de 30-50 mil tones de biomassa seca anualment. Dues espècies dominen el 90% de la producció *Arthrospira sp.* (*Spirulina*, *Arthrospira platensis*) i *Chlorella* (*Chlorella vulgaris*). La capacitat de les

explotacions varia entre menys de 10 a diversos milers de tones anuals. Les instal·lacions de gran capacitat usen cultius en basses obertes aconseguint costos de producció inferiors a 10 € per kg de biomassa seca. L'explotació més gran del món sembla ser la de Earthrise en el desert de Sonora a Califòrnia que ocupa 44 hectàrees. Altres productes i espècies que es comercialitzen estan resumits en la Taula II.1. Els preus de venda dels productes que apareixen en aquesta Taula són aproximats i depenen molt del format de comercialització, el territori i la relació entre oferta i demanda (que és volàtil a causa de la baixa producció a nivell mundial i els megaprojectes anunciats per diversos països en els últims anys).

Taula II.1 Productes comercialitzats procedents de microalgues i dades del mercat*

Producte	Producció mundial (t pes sec/any)	Nombre de productors (productors importants)	Valor anual de producció (milions \$ EUA)	Mercat Potencial
<i>Spirulina</i>	5.000 (2012) 30.000 (2019)	>15 empreses (Cyanotech, Earthrise)	40 (2005) 300 (2019)	Sense alternativa sintètica. Tassa creixement >10%
<i>Chlorella</i>	2.000 (2003) 5.000 (2017)	>50 empreses	38 (2006) 80 (2017)	Sense alternativa sintètica
Astaxantina (<i>Haematotococcus</i>)	300 (2004) 222 (2018 sintètica)	>8 empreses (Fuji Chemicals, Cyanotech)	10 (2004) 94 (2018)	Alternativa sintètica. 1-10% microalgues
Ficocianina i similars	35 (2019)	>2 empreses (Earthrise, Yunnan Green)	18 (2018)	Alternativa sintètica prohibida en UE
Omega-3 i similars (<i>Chrythecodium</i>)	240 (2003)	>4 empreses (Martek)	>300 (2004, Martek)	>\$ 14.390 (est. 2009)
β-carotè (<i>Dunaliella salina</i>)	1.200 (2010)	>10 empreses (Cognis/BASF)	432 (2015)	>\$ 480 Tassa creix. 4%
Isòtops bioquímics	¿?	Martek	>13	¿?
Productes bellesa	¿?	>4 empreses	¿?	¿?

*Dades de: *Microalgae-based products for the food and feed sector: an outlook for Europe*, JRC 2014 i elaboració pròpia.

La majoria dels productes comercialitzats es destinen al consum humà com a suplementos nutricionals o nutracèutics. La cadena de valor en aquest sector permet la viabilitat econòmica amb les tecnologies de producció actuals i l'ús de nutrients preparats especialment per als cultius. Cal destacar, tot i això, que aquest model d'explotació no es pot escalar indefinidament perquè és desconeguda la demanda eventual per a aquesta mena de productes. Pensem que les dades de l'estudi del mercat són volàtils. Un exemple pot ajudar entendre la nostra opinió: la majoria dels estudis de viabilitat de biorefineries es basen a un preu de producció d' Astaxantina de € 1600-6000. Malgrat això, en 2016 l' Astaxantina per via sintètica es comercialitzava a € 880. És probable que la prohibició del compost sintètic per a alguns usos eliminarà aquesta competència però la grandària del mercat també disminuirà de manera substancial. Les instal·lacions que exploren les

possibilitats de producció o coproducció de biocombustibles són principalment plantes pilot lligades a projectes de recerca i desenvolupament.

El nombre d'explotacions comercials no es coneix exactament. Segons l'Agència Internacional d'Energia (IEA) hi havia 306 empreses dedicades en l'explotació d'algues en el món en el període 2006-2014. La relació entre empreses dedicades a l'explotació de macro vs micro algues és 55:45. Tot i això les dades no són molt fiables: només l'associació Xinesa de la indústria d'algues tenia 600 membres en 2017. Usant la base de dades de la IEA (*State of Technology Review – Algae Bioenergy*, 2017) intentem verificar les dades contactant unes 80 empreses de microalgues localitzades a la UE: més de 35% de les pàgines web consultades havien desaparegut o estaven inactives. Els centres de recerca conjunta de la comissió europea (JRC) estan construint una base de dades de la bioeconomia “blava”. En 2019 tenien un inventari de 126 empreses amb unes 144 instal·lacions per a la producció d'algues de les quals un 43% estaven dedicades en microalgues. L'última informació verificada per a la Unió Europea es pot consultar en la Figura II.1

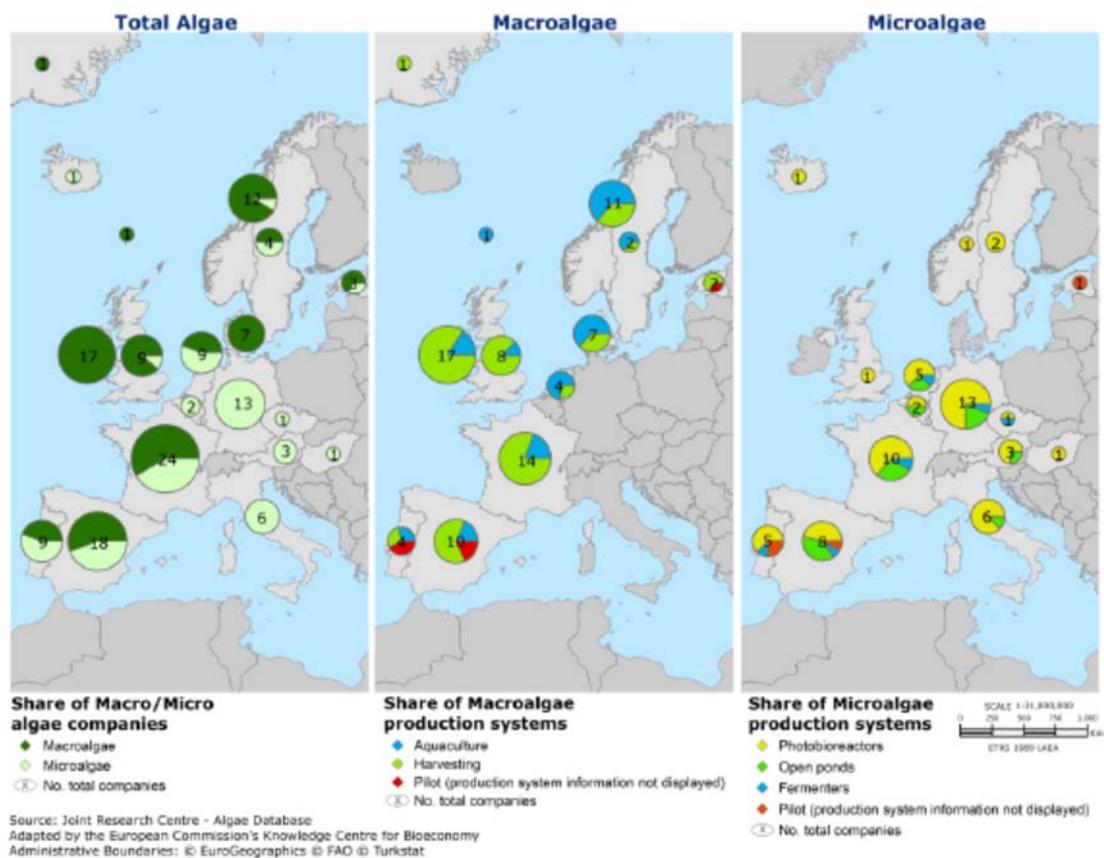


Figura II.1 Empreses dedicades a l'explotació d'algues en la Unió Europea: 18 empreses estan catalogades en l'estat espanyol y 8 d'elles es dediquen a la producció de microalgues

Catalunya

S'han identificat tres petites empreses a Catalunya, totes elles amb producció inferior a 1 t/any de Spirulina. Cal destacar que en el seu model de negoci, la comercialització directa

del producte (suplements nutricionals) permet un marge de negoci superior al que es pot intuir en la Taula II.1. El cultiu de Spirulina és possible en OP perquè el pH òptim de creixement és molt alt eliminant així la possibilitat de contaminació amb altres espècies o bacteris. Les empreses catalanes són de relativament nova creació. Una d'elles, amb objectiu de començar operacions a Cardedeu en 2020, tenim entès que ha ajornat la posada en marxa a causa de la baixa productivitat del cultiu.

BOX 1: EL MODEL ARTESANAL
A Catalunya i en el sud de França és molt habitual el cultiu "artesanal": aquestes són instal·lacions d'entre 100 i 300 m². Se centren en la producció de Spirulina produint entre 0,8 i 1 kg m². La seva viabilitat es basa en la possibilitat de comercialitzar el producte a preus superiors a € 150-200/kg basant-se al "comerç de proximitat". Els seus costos de producció freguen els € 100/kg. Es fan possibles gràcies a la baixa inversió inicial (€ 30-40 mil). No obstant això, reconeixen que és molt difícil introduir al mercat més que 100 kg per any. La precarietat del model condueix a molta mobilitat en el sector. És el cooperativisme una possible via d'evolució del model?

L'empresa Espirulina BIO (<https://espirulina.bio/>) va començar operacions fa vuit anys i produeix aproximadament 100 kg de Spirulina per any en una explotació de 100 m². Comercialitza els seus productes a preus molt més alts que la Taula II.1 permet pensar basant-se al

comerç de proximitat. Complementa les seves activitats amb seminaris de nutrició i similars.

L'empresa Microalgae Lab es va crear a Tarragona en 2019 (<https://microalgae.es/>). Amb instal·lacions OP de 300 m² se centra també en el cultiu de Spirulina però en lloc de centrar-se en la comercialització de la biomassa intenta avançar en mètodes d'extracció de productes d'alt valor afegit (ficocianina). A més usa les seves instal·lacions essencialment com un laboratori d'innovació a nivell planta pilot.

BOX 2: INNOVAR O MORIR
El Sr. Mario Muñoz, fundador de l'empresa Microalgae Lab a Tarragona, te l'ambició de viure de les microalgues i obrir nous camins: usa la seva instal·lació de 300 m² d'OP a Tarragona com una planta pilot per a desenvolupar nous sistemes de cultiu i nous productes. "Innovar o morir" és el seu credo i espera en breu transferir la tecnologia que desenvolupa a Canàries on la productivitat per m² és més alta que a Tarragona i apunta a l'economia del coneixement com un pla de negoci: usant la seva capacitat d'innovació i empenedoria vendrà més tecnologia que algues. És això un viable camí alternatiu als cultius "artesans"?

Estat Español

S'han identificat sis instal·lacions comercials o plantes pilot en la resta de l'estat espanyol. Entre aquestes n'hem pogut verificar tres com a instal·lacions comercials amb producció pròpia i cal destacar que en la Universitat d'Almeria opera des de fa anys una instal·lació important a nivell planta pilot i que està planificat en els pròxims anys instal·lar l'explotació més gran d'Europa (unes cinc hectàrees) com un projecte de demostració. Cap de les explotacions de l'estat enfoca la seva activitat comercial en biocombustibles. L'orientació i model de negoci és molt similar a l'oposat a Catalunya però el ventall de productes inclou a més de la Spirulina, *Tetraselmis sp.*, *Dunaliella salina*.

Destaca l'empresa Algalimento S.L. amb capacitat teòrica de producció superior o pròxima a 100 t/any. Està situada a Santa Lucia de Tirajana, Gran Canària (<http://www.algalimento.com/>) i és un exemple d'aplicació de principis de sostenibilitat usant energies renovables per al seu proveïment energètic i aigua de la mar per a molts dels seus cultius. Gaudeix d'importants sinergies amb l'Institut Tecnològic de Canàries i opera des de 2012.

Neoalgae S.L. és una empresa amb una àmplia llista de productes que s'especialitza en aquells que més valor afegit ofereixen des de cosmètica fins a l'alimentació funcional humana i animal, així com en la producció de fertilitzants aprofitant els residus de biomassa. L'empresa situada a Gijón, Astúries, opera des de 2012 amb instal·lacions pròpies a Astúries tancades en hivernacles. L'empresa és altament tecnològica i ofereix també serveis d'innovació en el camp de cultius de microalgues i desenvolupament de productes. És interessant notar que una altra empresa a Astúries (Algatek) s'enfoca exclusivament al desenvolupament de tecnologies capdavanteres per al cultiu d'algues.

Monzón Biotech a Huesca, Aragó és una empresa que evoluciona a partir d'un productor de sal (Monzón Sales) i aprofita la matèria primera per a introduir-se en el mercat de microalgues. Encara que es presenta com a productor de *Nannochloropsis* i *Dunaliella Salina* sembla que l'empresa es dedica primàriament a la recerca. Fitoplancton Marino S.L. és una empresa de Cadis que va trobar el seu nínxol en la producció de microalgues i la venda de serveis per al sector des de l'any 2002.

Algaenergy materialitza els esforços d'Iberdrola en el camp de microalgues i els seus productes principals són fertilitzants i cosmètica. Des de 2018 està participada per la multinacional Yokogawa i és potser l'exemple més consolidat en l'estat espanyol (i potser a Europa) de biorefineria de microalgues de l'economia circular: la seva planta industrial a Cadis aprofita el CO₂ produït per una planta de cogeneració d'Iberdrola. Malgrat això, no hem pogut assegurar la coproducció de biocombustibles.

Buggy power S.L. té instal·lacions a Portugal i a Lorquí, Múrcia comercialitzant aliments per a humans i animals. Des de l'any 2018 opera una instal·lació amb capacitat de planta pilot.

ASN Espirulina és probablement la més típica empresa de cultiu artesanal en la resta de l'estat i Phycoelementa l'última empresa *spin off* de la Universitat d'Almeria.

Exemples Internacionals

Per a identificar experiències Internacionals que poden servir com *benchmark* per a les Terres de l'Ebre, hem usat una eina d'identificació geogràfica de territoris amb potencial de desenvolupament sostenible de cultius de microalgues (per a la producció de biocombustibles) amb mínim impacte ambiental i màxim potencial econòmic. Segons aquesta eina el territori de les Terres de l'Ebre té un potencial mitjà i s'han trobat territoris amb similars característiques als EUA, la Xina i Turquia. No obstant això, per a cap de les explotacions identificades hem pogut trobar dades fiables o realitzar entrevistes. A més (per encàrrec) ens centrem en França on s'han identificat més d'una vintena d'instal·lacions i explotacions comercials amb característiques molt similars com les de Catalunya i la resta

de l'estat Espanyol (enfocament en suplementes alimentaris, especialment Spirulina, empreses familiars de poca capacitat productiva). Destaquen (per la varietat de productes, i.e. el cultiu de fins a 40 espècies diferents de microalgues) Microphyt, Biotech Marine (Seppic) i perquè sembla que experimenten també amb l'ús d'aigua marina i per l'extensió de les seves instal·lacions que arriben a 4 hectàrees i Alcazur perquè encara que és una explotació de Spirulina sembla posseir més superfície dedicada al cultiu. No ha estat possible realitzar entrevistes amb els responsables de les plantes per a obtenir més informació. La Taula II.2 resumeix la informació sobre aquestes explotacions a França. Hem identificat més de 40 empreses addicionals enfocades en Spirulina amb seu majoritàriament en el sud del país. En la Taula II.2 s'esmenten les més importants encara que totes segueixen el model "artesanal".

Tabla II.2 Explotacions de microalgues en França

Empresa	URL	Enfocament	Tipus alga
Biotech Marine/Seppic	www.seppic.com/en	Gran varietat de productes, participada por Air Liquide	Vàries
Microphyt	www.microphyt.eu/	Productes nutricionals i de bellesa	40 espècies
Alcazur	www.algazur.fr/	Nutrició	Spirulina
Algosud	www.algosud.com/	Nutrició	Spirulina
Couleur Spiruline	www.couleurspiruline.com	Nutrició	Spirulina
Le Chant de L'Eau	www.lechantdeleau.fr	Nutrició	Spirulina
Spiruline d'Olt	https://spirulinedolt.fr/	Nutrició	Spirulina
Spir'Alpines	www.spiralpilles.com	Nutrició	Spirulina
Spirulib	www.spirulib.com	Nutrició	Spirulina
Spiruline La Capitelle	www.spirulinelacapitelle.com/	Nutrició	Spirulina
Algosource	https://algosource.com/	Nutrició, bellesa, salut	<i>Porphyridium, Scenedesmus, Spirulina</i>
Fermentalg	www.fermentalg.com/	Gran varietat, fermentació	Vàries
GreenTech	www.greentech.fr/en/	diversificada	Vàries

III. MODELS D' EXPLOTACIÓ

Els tres models d'explotació que s'ha triat estudiar corresponen a diferents estratègies i pla de negoci d'implementació de biorefineries de microalgues. En tots els casos s'ha usat com a "cas base" una explotació basada en OP (basses obertes).

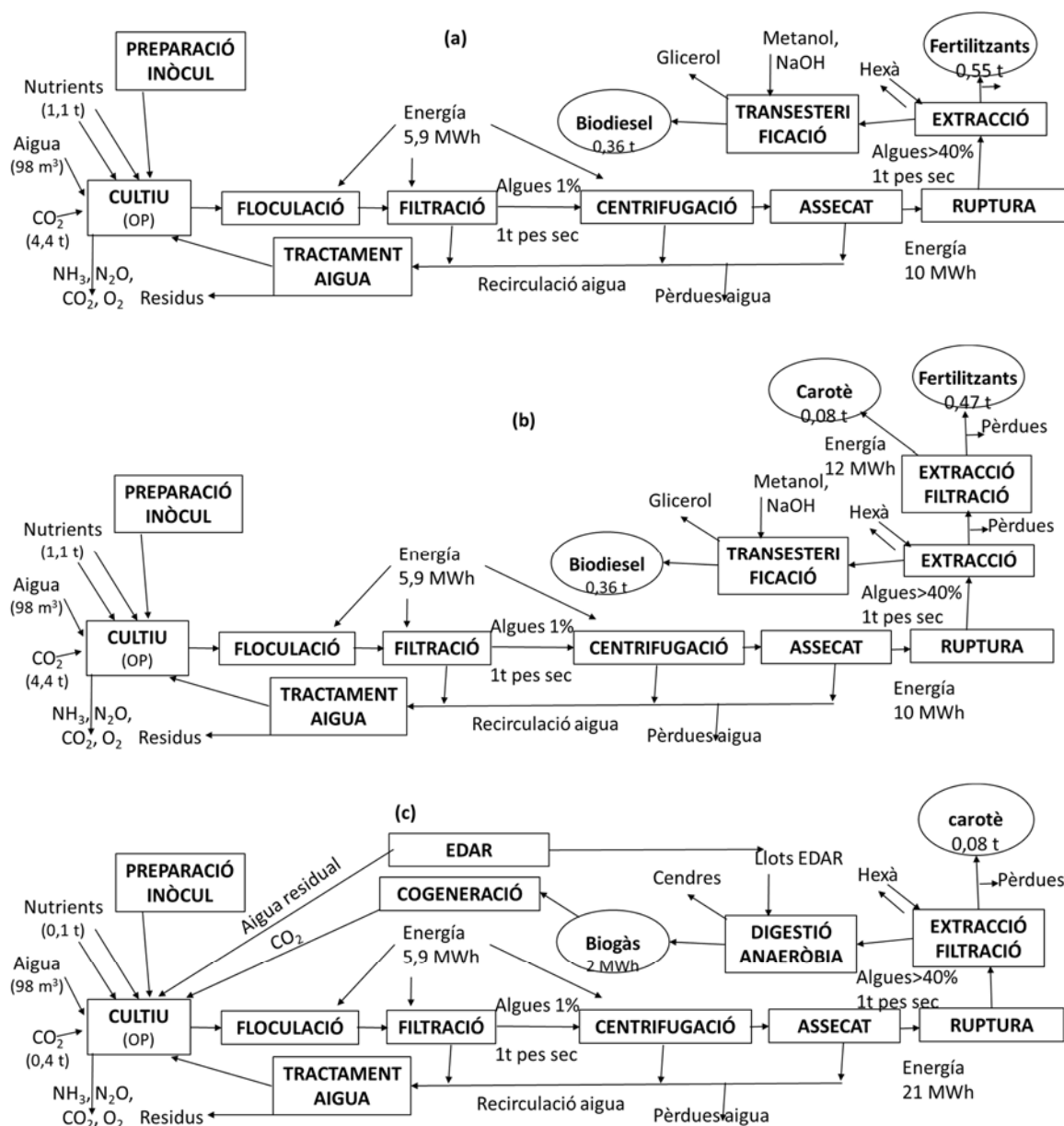


Figura III.1 Diagrames de blocs dels processos base suposats als tres models analitzats (a) Producció exclusiva de biocombustibles (BC), (b) Model de biorefineria integrada amb coproducció de β carotè (BI) i (c) Model de l'economia circular (igual que BI però integrat amb una EDAR, CE)

El model de Biocombustibles (BC) correspon al model més tradicional el principal mèrit del qual és la disminució de la petjada de carboni de biocombustibles. Se suposa la utilització d'espècies de microalgues amb alt rendiment en àcids grassos (*Nannochloropsis gaditana*) que es poden convertir en biodièsel en un procés posterior. Per a poder comparar els tres models, no obstant això, la unitat funcional que es va usar per a tots els càlculs ha estat el kg de biomassa produïda. En aquest cas, els productes del procés serien biodièsel i les restes de biomassa que es podran usar com a fertilitzant. Tot i així, per a procedir a la simulació s'ha utilitzat com a criteri que el cost de la biomassa produïda fos inferior a 2 €/kg. En cap dels escenaris contemplats això ha estat possible i per consegüent aquest model es manifesta inviable.

El model de la Biorefineria Integrada (BI) suposa l'ús de *Dunaliella salina* com microalga per a la producció de biocombustible, d'una banda, però també de β carotè com a exemple de producte d'alt valor afegit. Per consegüent, en la simulació estan incloses les operacions unitàries adequades.

En tots dos models s'ha suposat que els nutrients per al creixement de les MA es preparen en la instal·lació a partir de les matèries primeres. S'ha assumit una ràtio alta de recirculació del brou de cultiu per a minimitzar les aigües residuals produïdes. La recirculació compta amb un tractament intermedi per a l'eliminació d'acumulacions.

En el tercer model de l'economia circular (CE) s'usa un consorci de microalgues que s'ha vist en la bibliografia que pot formar part d'una EDAR. L'alimentació en aquest cas és només escassament complementada amb nutrients (se suposa un 10%) ja que la font principal de P i N és l'aigua residual de la EDAR. En aquest cas el CO₂ procedeix d'algun focus d'emissió de CO₂. El producte d'alt valor (per a facilitar la comparació) és el mateix que en el cas BI però en comptes de produir biodièsel es produeix biogàs. Els tres diagrames de blocs amb les suposicions fetes per als balanços de matèria es veuen en la Figura III.1

Biocombustibles

En la Taula III.1 es poden consultar les dades principals utilitzades per a aquesta simulació. Les dades econòmiques es resumeixen en l'Annex I.

Taula III.1 Resum de paràmetres utilitzats en la simulació del model BC

Paràmetre	Valor	Paràmetre	Valor
Localització	Terres de l'Ebre	Temperatura	20°C (mitjana)
Sistema cultiu	Basses obertes	Requisit CO ₂	1,8 g/g biomassa
Ràtio recirculació	96%	Requisit N (KNO ₃)	5 mM
Radiació solar	120 W m ⁻²	Requisit P (KH ₂ PO ₄)	0,1 mM
Dies operació	240/any	Productivitat	3 g m ⁻² d ⁻¹

Els resultats de l'anàlisi econòmica mostren que el cost de producció de biomassa (203 € per kg) és més que dos ordres de magnitud superior del màxim permisible per a aconseguir un nivell que es considera rendible (inferior a € 1 per kg per a la producció de biocombustibles). Encara que els impactes ambientals són positius, especialment en la reducció de gasos d'efecte d'hivernacle, la rendibilitat de la instal·lació és impossible amb les suposicions esmentades (cas base conreu de 1400 m²). Una operació amb producció

anual de 200 tones que ocuparia 14 ha, arribaria a produir biomassa a un cost de € 10 per kg que sota algunes suposicions de l'anàlisi de sensibilitat (veure apartat V) podria ser rendible. No obstant això, la inversió inicial per a aquesta instal·lació superaria els 13 milions d'euros.

Malgrat millores que es poden implementar per a millorar la viabilitat econòmica i la sostenibilitat del model en general (veure apartat IV), aquest model es considera inviable i no s'examina en més detall. Els resultats de la simulació es poden trobar en la Taula III.2.

Taula III.2 Resultats de la simulació del model BC

Paràmetre	Cas base	Cas extensió	Cas productivitat
Àrea cultiu	1.400 m ²	70.000 m ²	10.500 m ²
Productivitat	3 g m ⁻² d ⁻¹	3 g m ⁻² d ⁻¹	20 g m ⁻² d ⁻¹
Producció BPS*	1 t/any	500 t/any	500 t/any
Consum aigua	98 m ³ /any	49.000 m ³ /any	49.000 m ³ /any
Consum CO ₂	4,4 t/any	2.200 t/any	2.200 t/any
Consum nutrients	0,5 t/any	250 t/any	250 t/any
Consum energia	10 MWh/any	5.000 MWh/any	5.000 MWh/any
Consum electricitat	5,9 MWh/any	2.950 MWh/any	2.950 MWh/any
Cost matèries prim.	983 €/any	491.500 €/any	491.500 €/any
Cost elec. + ener.	842 €/any	421.000 €/any	421.000 €/any
Cost laboral	136.000 €/any	447.500 €/any	181.878 €/any
Inversió	403.500 €	39.940.000 €	17.882.000 €
Cost operació	167.049 €/any	1.675.100 €/any	1.218.494 €/any
Cost BPS*	207 €/kg	11 €/kg	6 €/kg

*BPS: Biomassa pes sec

Biorefineries integrades

En la Taula III.3 es poden consultar les dades principals utilitzades per a aquesta simulació. Les dades econòmiques es resumeixen en l'Annex I.

Taula III.3 Resum de paràmetres utilitzats en la simulació del model BI

Paràmetre	Valor	Paràmetre	Valor
Localització	Terres de l'Ebre	Temperatura	20°C (mitjana)
Sistema cultiu	Basses obertes	Requisit CO ₂	1,8 g/g biomassa
Ràtio recirculació	96%	Requisit N (KNO ₃)	5 mM
Radiació solar	120 W m ⁻²	Requisit P (KH ₂ PO ₄)	0,1 mM
Dies operació	240/any	Productivitat	3 g m ⁻² d ⁻¹
Espècie MA	<i>Dunaliella salina</i>	Fertilitzants	47%
% carotè extraïble	8	Biodiesel	36%

Els resultats de l'anàlisi econòmica mostren que el valor actual net (VAN) suposant una amortització lineal a 10 anys s'igualava a 0 a partir d'una producció de 8 t de biomassa per any (ocupant uns 11.000 m²). La inversió inicial per a aquesta mena d'instal·lació seria de € 3 milions per al cas base. Els impactes ambientals són positius tant per als gasos de

l'efecte d'hivernacle com per a l'eutrofització possiblement per la suposició sobre el tractament de les aigües residuals.

S'ha advertir que els resultats són molt sensibles al preu de venda del producte d'alt valor (β carotè). Encara que en la bibliografia s'assegura que el seu preu és de € 1000 per kg, el seguiment de compres a l'engròs indica un preu més pròxim a € 100 per kg. Fixant la producció de la planta del model BI a 80 t per any de biomassa seca (uns 6,4 t de carotè que correspon aproximadament al 2% de la demanda mundial anual) el preu necessari per a aconseguir VAN 0 és de 330 €/kg. Aquesta planta ocuparia unes 6 ha i la inversió inicial seria de € 12 milions. Els resultats de la simulació es poden examinar en la Taula III.4.

Taula III.4 Resultats de la simulació del model BC

Paràmetre	Carotè: €1000/kg	Carotè: €330/kg
Àrea cultiu	11.111 m ²	55.550 m ²
Productivitat	3 g m ⁻² d ⁻¹	6 g m⁻² d⁻¹
Producció BPS*	8 t/any	80 t/any
Consum aigua	784 m ³ /any	7840 m ³ /any
Consum CO ₂	35,2 t/any	352 t/any
Consum nutrients	4 t/any	40 t/any
Consum energia	248 MWh/any	2840 MWh/any
Consum electricitat	143 MWh/any	1430 MWh/any
Cost matèries prim.	14.000 €/any	140.000 €/any
Cost elec. + ener.	22.580 €/any	225.800 €/any
Cost laboral	140.000 €/any	160.000 €/any
Inversió	3.013.000 €	12.329.000 €
Cost operació	321.673 €/any	869.941 €/any
Cost BPS*	44 €/kg	13 €/kg
Producció carotè	0,64 t/any	6,4 t/any
Pr. Fertilitzants*	3,76 t/any	37,6 t/any
Pr. Biodiesel*	3,88 t/any	28,8 t/any
Ingressos	634.144 €/any	2.143.000 €/any
VAN*	20.168 €	40621 €

*BPS: Biomassa pes sec, VAN: valor actual net (amortització 10 anys), preus venda: Biodiesel, 0,54 €/L, fertilitzants 0,3 €/kg

L'impacte ambiental com GWP i FEP només es pot calcular en aquest cas perquè existeixen productes i podem comparar aquests impactes amb l'escenari base que és la producció d'aquests productes a partir de matèries primeres fòssils. La millora al GWP és de 0,14 t CO₂ eq/t de BPS i al FEP de 0.039 kg Peq/t BPS. Aquests resultats no garanteixen un impacte ambiental negatiu però sí que asseguren una millora respecte a les alternatives fòssils (la metodologia seguida es descriu en: G. Thomassen et al., *Green Chem.*, 2019, 21, 5945).

Economia circular

En la Taula III.5 es poden consultar les dades principals utilitzades per a aquesta simulació. Les dades econòmiques es resumeixen en l'Annex I.

Aquest model és diferent en el sentit que s'incorpora en una "ecosistema" industrial: el cultiu se suposa que s'alimenta amb aigües destinades a depuradores després del tractament primari. D'aquesta manera, s'elimina un 90% dels costos de nutrients. El concepte no està demostrat però existeix suficient informació per a situar la tecnologia a un TRL superior a 6. En tot cas, la instal·lació estaria situada al costat d'una depuradora i funcionaria de manera simbiòtica amb aquesta. El "preu" que es paga per aquesta modificació és que no es pot parlar d'una espècie de microalgues en el cultiu sinó d'un consorci de les mateixes la composició de les quals és difícil controlar. Es veurà per consegüent afectada la composició de les algues en productes d'alt valor. Finalment, aquells productes que es destinen a l'alimentació s'hauran d'esterilitzar.

En segon lloc, aquest model és similar al de la biorefineria integrada però en comptes de produir biodièsel, la fracció de la biomassa després de l'extracció dels carotè se sotmet a una digestió anaeròbia per a produir biogàs. El biogàs es pot usar en un procés de cogeneració per a produir la calor i l'energia elèctrica necessària per al procés. Els gasos de combustió del cogeneratedor (que contenen CO₂) es poden usar per a alimentar el cultiu de les algues. Es coneix que la digestió anaeròbia que produeix el biogàs es facilita si s'afegeixen al cultiu llots de la EDAR. En aquest sentit tot el procés s'aproxima a un model d'emissions zero.

Taula III.5 Resum de paràmetres utilitzats en la simulació del model CE

Paràmetre	Valor	Paràmetre	Valor
Localització	Terres de l'Ebre	Temperatura	20°C (mitjana)
Sistema cultiu	Basses obertes	Requisit CO ₂	1,8 g/g biomassa
Ràtio recirculació	96%	Requisit N (KNO ₃)	5 mM
Radiació solar	120 W m ⁻²	Requisit P (KH ₂ PO ₄)	0,1 mM
Dies operació	240/any	Productivitat	3 g m ⁻² d ⁻¹
Espècie MA	ConSORCI MA	Biogàs (MWh/t BPS)	1,6
% carotè extraïble	4-8		

Els resultats de l'anàlisi econòmica mostren que el valor actual net (VAN) suposant una amortització lineal a 10 anys s'igualava a 0 a partir d'una producció de 24 t de biomassa per any (ocupant uns 3,3 ha). Cal destacar que aquesta capacitat s'aconsegueix amb el preu límit del cas anterior per al carotè (€ 330 per kg). La inversió inicial per a aquesta mena d'instal·lació seria de € 2,6 milions per al cas base. No ha estat possible calcular els indicadors de sostenibilitat perquè es desconeix la càrrega ambiental de la EDAR i llots, però és obvi que el model genera aproximadament zero emissions: pot tractar uns 22 m³ de llots de depuradora cada 30 dies i convertir-los en biogàs el valor tèrmic del qual és 70 MWh/any (la planta de cultiu i producció de carotè necessita uns 382 MWh d'electricitat i 264 MWh de calor així que amb una cogeneració eficaç amortitzaria gairebé el 10% de la necessitat d'energia de la planta.

Aquest model, sembla per consegüent el més atractiu econòmicament però també ambientalment. No obstant això, és potser el de més risc tecnològic (encara que les

fermentacions anaeròbies s'han implementat per a generar biogàs a partir de les purines del porcí). Els resultats de la simulació es poden examinar en la Taula III.6.

Taula III.6 Resultats de la simulació del model CE

Paràmetre	Carotè: 8%	Carotè: 4%
Àrea cultiu	33.333 m ²	180.000 m ²
Productivitat	3 g m ⁻² d ⁻¹	3 g m ⁻² d ⁻¹
Producció BPS*	24 t/any	131 t/any
Consum aigua	235 m ³ /any	1.283 m ³ /any
Consum CO ₂	10,6 t/any	60 t/any
Consum nutrients	1,2 t/any	6,5 t/any
Consum energia	264 MWh/any	1.441 MWh/any
Consum electricitat	382 MWh/any	2.086 MWh/any
Cost matèries prim.	9.640 €/any	52.634 €/any
Cost elec. + ener.	42.377 €/any	231.378 €/any
Cost laboral	150.000 €/any	217.000 €/any
Inversió	2.622.000 €	9.319.000 €
Cost operació	357.315 €/any	810.317 €/any
Cost BPS*	25 €/kg	14 €/kg
Producció carotè	1,92 t/any	5,2 t/any
Pr. Biogàs*	71 MWh/any	402 t/any
Ingressos	633.600 €/any	1.744.000 €/any
VAN*	16.755 €	2.232 €

*BPS: Biomassa pes sec, VAN: valor actual net (amortització 10 anys), la conversió de biomassa a biogàs per digestió anaeròbia s'ha calculat segons: H.M Zabed et al., *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 117 (2020) 109503

IV. SOLUCIONS ADAPTADES AL TERRITORI

Sembla obvi que el model de l'economia circular examinat en l'apartat III és el més adequat per a seguir (no sols en les Terres de l'Ebre sinó a tot el món) si un creu que la Biorefineria Integrada basada en residus com a alimentació és una de les opcions viables per a introduir un model productiu post-petroli. Si mes no, l'anàlisi demostra que l'estratègia d'implementació ha de tenir en compte dos principis:

- a. Qualsevol solució ha d'estar basada a les particularitats del territori i
- b. La implementació a gran escala amb un model integrat serà necessàriament de risc mig-alt.

En aquest informe no es pot solucionar la segona consideració: el tema atreu l'atenció de molts investigadors i centres tecnològics de molts països; per tant es raonable esperar que ràpidament el TLR de les tecnologies millorarà i el risc s'atenuarà.

La nostra cerca de la bibliografia i la literatura tecnològica i empresarial revela diverses possibilitats per a la primera consideració: la implementació adaptada al territori.

Encara que les Terres de l'Ebre no sofreixen per falta de recursos hídrics, és interessant destacar que moltes microalgues estan adaptades a alta salinitat i per consegüent podran ser les espècies més adequades. Cal tenir en comte, però, que la riba de la mar en les Terres de l'Ebre està en gran part protegida i acull altres activitats econòmiques com el turisme i l'agricultura. Caldria, doncs, estudiar si existeix terreny adequat per a aquesta mena d'instal·lacions tenint en compte l'impacte ambiental i paisatgístic.

La possibilitat anterior incita estudiar la combinació del model CE amb l'aqüicultura: les microalgues poden servir tant com depuradores d'aquestes explotacions com d'aliment ric en greixos omega-3, especialment beneficioses en aquesta indústria. La possibilitat d'instal·lar els cultius en aiguamolls o fins i tot dins de la mar pot evitar les reticències paisatgístiques i de competència amb el turisme i l'agricultura esmentades a dalt. Existeixen exemples en la bibliografia d'implementació d'aquestes sinergies en piscifactories de salmó i granges de gambes. El delta de l'Ebre acull possiblement la més intensa activitat de cultiu de mol·luscos en l'estat espanyol. No podem, malgrat tot, assegurar que hi ha algun avantatge per a l'ús de microalgues en aquestes explotacions.

La insolació del territori, encara que no la més alta en l'estat espanyol, permet pensar en la instal·lació de panells solars en el lloc del cultiu. Això es pot fer amb sistemes actius o passius: estem convençuts que la manera òptima de cultiu de microalgues en el territori és en sistemes delimitats amb estructures tipus hivernacle, encara que tenen un efecte visual negatiu. Aquestes estructures permeten la protecció del cultiu del sol, la contaminació i dels elements naturals. Presenten un bon compromís entre els PBRs que normalment són més cars d'instal·lar i les totalment exposades basses (OP). Però poden a més ser molt útils per a estendre el període del cultiu atrapant calor de manera natural i mantenint la temperatura estable durant la nit o en moments de fred (com hem esmentat, algunes espècies d'algues són extremadament sensibles a canvis de temperatura). L'emmagatzematge d'aigua en aquestes estructures (per exemple en les parets) pot servir com un regulador de la temperatura durant el dia i la nit a causa de l'alta capacitat calorífica de l'aigua. A més d'aquesta solució de "baixa" tecnologia existeix la possibilitat de la instal·lació de panells fotovoltaics sempre que existeixi suficient espai per a la instal·lació. Es necessiten més de 100 m² per a produir de manera fiable els més de 20 MWh que són el requisit mínim per a cada any. La inversió supera € 15 mil però podria ser una solució sobretot en llocs allunyats de la xarxa.

Finalment, s'ha de tenir en compte la "ecologia industrial": en el model CE és crític aconseguir una ubicació pròxima a una EDAR tant per a aconseguir aliment com per a la co-digestió anaeròbia. D'altra banda, la proximitat a instal·lacions de producció d'energia permet el proveïment amb CO₂ i la possibilitat d'alimentar les seves instal·lacions de cogeneració amb el biogàs produït. En el territori apareixen en el registre PRTR cinc entrades de la indústria química i de producció d'energia/combustió. La més important és l'empresa Tortosa Energia que gestiona la cogeneració de Ercros en el polígon industrial de Tortosa i tres de les altres estan en el mateix polígon. A primera vista és difícil trobar

suficient espai (més de 1-2 ha) prop d'aquestes empreses per a instal·lar un biorefineria de microalgues (només Tortosa Energia produeix més de 150 mil tones anuals de CO₂, suficient per a proveir més mil ha de biorefineria d'algues, gairebé el 2% de la superfície del Montsià). La cinquena empresa, BEAR Química sembla estar instal·lada en un terreny lliure (encara que de propietat) i sembla disposar de processos de combustió (calderes). Aquesta seria una bona ubicació per a la instal·lació d'una planta pilot en el territori. D'altra banda, hi ha dos EDAR en el territori convenientment situades prop de la mar, la de Sant Carles de la Ràpita i la de Cases d'Alcanar, ambdues tractant més de 1000 m³ per dia, cabal més que suficient per a un experiment d'economia circular.

Dit això, existeix també la possibilitat de solucions modulars, una producció distribuïda d'algues segons el model de les “parets verdes” implementat des de 2013 en la façana de l'edifici BIQ a Hamburg. Les parets externes de l'edifici funcionen com un fotobioreactor (PBR) de 200 m² aïllant l'edifici i produint energia: només les algues recollides durant l'any produeixen uns 30 kWh m⁻² any⁻¹ que s'aprofiten pels residents. La possibilitat de la producció descentralitzada d'energia no és nova i la seva implementació sota algunes condicions és sostenible.

V. CONCLUSIONS I ANÀLISI DE SENSIBILITAT

En l'anàlisi anterior no s'han calculat els costos de sòl degut a la incertesa d'ubicació de les possibles biorefineries. En el territori aquest pot ser un cost important. Per consegüent s'ha triat com un paràmetre per a examinar la seva contribució als resultats: els dos models econòmicament viables (BI i CE) es poden convertir fàcilment inviables si el cost de sòl supera els € 5 m⁻². A través d'una breu cerca de preus de sòl industrial a Tortosa vam veure un anunci a € 31 m⁻². Aquest preu afegiria entre 1 i 5 milions en els escenaris contemplats per al model CE (aproximadament el 50% de la inversió inicial) convertint-los en inviables. L'efecte al model BI és de l'ordre del 10% de la inversió inicial i és assumible. Concloem que el preu del sòl és un important determinant de viabilitat i si supera els € 5 m⁻² s'hauria d'afinar més el model.

Per la naturalesa de l'estudi s'han suposat els costos d'operació administratius i de contingències com un percentatge del cost dels equips. Aquests en realitat es poden modular segons la realitat de cada empresa i la situació de cada emprenedor. Per aquesta raó s'ha fet l'anàlisi de contribució sense tenir aquests costos en compte i s'ha revelat que els costos laborals són la despesa que contribueix més del 50% en tots dos models per a les produccions més baixes. Amb l'escalat de la producció, com és natural, els costos laborals baixen fins al 10% en el model BI i el 20% en el CE. Això és així perquè el model CE produeix menys producte d'alt valor. La contribució és lògica i la conclusió és que el model BI és més robust enfront de fluctuacions de costos de personal. Usem el que és habitual per als reactors de basses obertes (OP) un operador per a cada 10 ha de conreu a més de tres treballadors de tasques generals. Aquesta és una de les raons que ens hem decantat a estudiar només la implementació dels OP i no PBR. Encara que la productivitat dels PBR és normalment més alta però no tant com per a amortitzar els extra costos.

Les despeses energètiques són superiors als de matèries primeres. Són especialment importants en els processos que inclouen filtració/centrifugació en els quals també es veu afectada la inversió inicial de manera significativa. Seguint els arguments anteriors, en produccions baixes són menys importants (10% o menys) i pugen amb l'escalat de la producció fins al 25-28% dels costos d'operació. El balanç d'energia és el que menys rigorosament es pot fer en aquesta mena d'estudis per això deixem variar a l'alta els costos d'energia: una altra vegada, el model CE és més susceptible a aquestes variacions, tornant inviable si el consum d'energia augmenta un 10%. Encara que pensem que el consum energètic que hem suposat és el "pitjor cas" la nostra recomanació és fer els balanços d'energia rigorosament abans de decidir una inversió. Les operacions d'assecat i ruptura de les algues són les que més costos energètics suposen i la nostra conclusió en aquest sentit és buscar alternatives (hem examinat la possibilitat de no assecar totalment la biomassa abans del trencament de les cèl·lules i les despeses energètiques poden disminuir fins al 20%).

Les dades d'inversió en la unitat de transesterificació són importants en els models BC i BI. Es basen en recerca bibliogràfica i ús de l'índex CEPCI de cost d'equips de la indústria

química i les habituals relacions d'escalat. La viabilitat de tots dos models depèn de manera molt sensible a aquests costos i es converteixen a inviables amb menys de 5% de variació a l'alta d'aquests equips.

La temperatura del cultiu és un dels importants paràmetres de productivitat. S'ha suposat que la termoregulació s'aconseguirà usant sistemes passius, sense necessitat de despesa addicional d'energia. Per aquesta raó hem suposat només 240 dies a l'any d'operació. Si hi hagués la necessitat d'escalfar el cultiu les despeses d'energia d'aquesta operació poden passar de $5,9 \text{ MWh t}^{-1} \text{ any}^{-1}$ a 15 ó 20. En aquesta eventualitat recomanem (com abans) fer els balanços d'energia de manera més rigorosa.

Els paràmetres que més afecten l'anàlisi econòmica són la productivitat de les algues (pes sec produït per m^2 i dia) i els dies d'operació. Tots dos afecten la inversió i influeixen les variables d'operació de les operacions unitàries. En aquest sentit, en tota la nostra anàlisi intentem ser conservadors. S'ha utilitzat la productivitat de $3 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ per a la simulació i 240 dies d'operació. Aquestes dades són consistents amb l'experiència dels emprenedors de la zona. Però estem convençuts que la productivitat pot arribar fins als $20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ si les hi OP es cobreixen parcialment i si es controla el cultiu correctament. Un de nosaltres ha aconseguit de manera consistent productivitat d'entre 16 i $20 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ a nivell planta pilot a Tarragona (C. Nurra et al., Bioresource Technology 163 (2014) 136–142). En la Taula III.4 es pot apreciar l'important efecte que té l'augment de productivitat en la viabilitat del procés. Comparant els nostres resultats amb la bibliografia notem que el nostre cost per kg de biomassa seca és dels més alts que s'han publicat. La raó és que en general se suposa una productivitat tres o quatre vegades superior a la que usem i una operació de la planta durant 300 o 330 dies. Pensem que aquestes suposicions són optimistes però encara així hem deixat marge perquè la realitat sigui millor que la planificació.

El problema principal que veiem és l'optimisme sobre els preus dels productes d' "alt valor afegit". Creiem que és optimista pensar que el carotè es pot vendre fins i tot a 330 €/kg. Això significa que per a tenir seguretat caldria orientar-se a productes amb més valor o integrar la cadena del valor afegint el desenvolupament del producte en les activitats dels possibles esforços comercials.

Es pot concloure que el sector de biorefineries basades en microalgues se centra en els productes d'alt valor afegit. Està en estat naixent tant en l'estat espanyol com mundialment. En particular a Catalunya és, a més, artesanal, i centrat principalment en la venda de la biomassa sencera com a suplement nutricional (sense posterior extracció de components que afegeixen valor). Aquestes explotacions són de capacitat escassa i no influeixen de manera important el balanç de carboni (per consegüent, la seva sostenibilitat ambiental és nul·la o escassa). A Espanya la situació és similar però existeixen com a mínim tres exemples d'empreses amb més entitat i varietat de productes. Aquesta situació genera incertesa: els projectes anunciats de gran capacitat poden inundar el mercat amb els productes d'"alt valor" i aquests poden deixar de ser-ho ràpidament. Per aquesta raó opinem que els monocultius enfocats a aquest mercat no responen a un model de producció sostenible i robust. La integració de les explotacions i la seva modularitat són

característiques que s'han de fomentar. L'exploració de noves cadenes de valor (per exemple biopolímers basats en microalgues) pot millorar aquesta modularitat.

La nostra anàlisi suggereix que els obstacles principals per a la viabilitat del procés són tècnics: la fase de deshidratació (eliminació de l'aigua) i l'extracció dels components de l'alga són no sols els que més energia i inversió requereixen sinó també els que més s'han d'adaptar a les diferents espècies. L'activitat investigadora orientada a resoldre aquests problemes és important i el progrés de TRL de les diferents solucions proposades pot resoldre'ls en breu (en 2-4 anys). No obstant això, la fase de demostració és difícil en aquest camp i si hi ha interès s'hauria de fomentar la creació d'una planta pilot a gran escala com a plataforma de demostració.

Òbviament, la productivitat de les microalgues és un altre paràmetre molt important i limitat per la naturalesa. Existeixen línies de recerca que proposen l'ús d'organismes modificats genèticament (OMG) per a superar aquesta limitació. En la nostra opinió la legislació europea sobre OMG no promou aquest tipus de solucions. Encara que més lent, el concepte de l'evolució dirigida sota pressió ambiental pot aconseguir els mateixos resultats i complir amb la legislació, especialment per als cianobacteris. Si aquesta evolució es dirigeix a més a resoldre els problemes tècnics esmentats (per exemple per a facilitar la filtració) podria ser una àrea on es troben la biologia i l'enginyeria per a resoldre els problemes que la tecnologia presenta encara.

ANNEX I

Els costos d'operació i inversió es van calcular aplicant les directrius habituals d'avaluació de costos de plantes químiques aplicant les dues següents taules:

Inversión	Operación
Direct capital costs PBR cost Piping and fitting Pumps and other equipment Electrical equipment Field laboratory Total direct cap. costs (TDC) Indirect capital costs Engineering & supervision (5% of TDC) Installation (10% of TDC) Tax & insurance (1% TDC + Land) Total indirect capital costs Fixed capital investment (FCI) Land Total fixed capital (TFC)	Direct operating costs Employee expenditure Raw materials Electricity Consumables Total direct operating costs (TDO) Indirect operating costs (\$/y) Maintenance (5% of TFC) Overhead (10% of TDO) Administration (10% of TDO) Total indirect operating costs Total operating costs

COSTOS INVERSIÓ:

Les canonades i la instal·lació es van calcular de tal manera que el cost TFC és 2,8 vegades el cost de compra de l'equip (TDC). Els costos de cada equip s'han calculat demanant ofertes a proveïdors, parlant amb tècnics que han fet instal·lacions similars, investigant i contrastant la bibliografia. Si al final s'ha obtingut un preu d'un altre any, es va actualitzar a 2020 usant els índexs CEPCI. Si la capacitat de l'equip era diferent, es va ajustar el preu usant la fórmula habitual d'ajust de capacitat $(\text{Preu A}/\text{Preu B}) = (\text{Capacitat A}/\text{Capacitat B})^n$, on n és el factor d'escalat acceptat per a cada tipus d'equipament. La unitat de transesterificació es va calcular sencera (no equipo per equipo) perquè es van trobar moltes referències en aquest sentit: Equip de transesterificació en $\text{EUR} \cdot \text{t}^{-1} \cdot \text{h} = 1.874.140 \cdot \text{Capacitat} [\text{t} \cdot \text{h}^{-1}]^{-0.4}$

COSTOS OPERACIÓ:

Es van usar els preus del mercat més actualitzats per a Europa:

Nutrients: 500 €/t, CO₂: 80 €/t, Dissolvents extracció: 393 €/t, Metanol: 380 €/t, NaOH: 300 €/t, Membrana 336 €/m² i canvi 3 vegades/any

cost mitjà de persona /año: 45.000 €

Electricitat (industrial): 92 €/MWh

Gas natural: 38 €/MWh