



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE MULTIESCENARIOS PARA UNA BIORREFINERÍA EN BASE A BIOMASA DE MICROALGAS Y SELECCIÓN DE SITIOS DE CULTIVO EN CHILE

CRISTIÁN PATRICIO BRAVO FRITZ

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:
CÉSAR ANTONIO SÁEZ NAVARRETE

Santiago de Chile, Octubre 2015

© MMXV, CRISTIÁN PATRICIO BRAVO FRITZ



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE
ESCUELA DE INGENIERIA

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE MULTIESCENARIOS PARA UNA BIORREFINERÍA EN BASE A BIOMASA DE MICROALGAS Y SELECCIÓN DE SITIOS DE CULTIVO EN CHILE

CRISTIÁN PATRICIO BRAVO FRITZ

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

CÉSAR ANTONIO SÁEZ NAVARRETE

JOSÉ RICARDO PÉREZ CORREA

ALBERT LEANDRO HERRERA ZEPPELIN

MARIA ELENA LIENQUEO CONTRERAS

IGNACIO CASAS RAPOSO

Para completar las exigencias del grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Octubre 2015

A Natalia, padres, hermanos,
familiares, amigos y profesores,
quienes me apoyaron de forma
incondicional durante este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis fue parcialmente financiada por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) del Gobierno de Chile a través de la Beca para Magíster Nacional entregada a Cristián P. Bravo-Fritz (No. 22130431), y por el Consorcio Empresarial AlgaeFuels S.A financiado por la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO) y el Ministerio de Energía de Chile (INNOVACORFO 09CTEI-6861), a través de su convenio con el grupo de investigación en energías renovables del Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Agradezco a ambas instituciones por creer y apoyar el potencial impacto país inherente al empleo bioenergético de microalgas. A los profesores César Sáez y Leandro Herrera por su guía experta y oportunidades entregadas a lo largo de estos años. Y finalmente, a mis compañeros de postgrado, por compartir sus conocimientos y útiles consejos, además de haber propiciado un ambiente desafiante y cargado de buenos momentos.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN LITERARIA.....	1
1.1.1. Energía y bioenergía	1
1.1.2. Microalgas	2
1.1.3. Biorrefinería.....	3
1.1.4. Digestión anaerobia (DA).....	3
1.1.5. Potencialidad de la industria de microalgas para Chile	4
1.1.6. Estructura general de la tesis	4
1.2. HIPÓTESIS.....	5
1.3. OBJETIVOS.....	6
1.4. METODOLOGÍA GENERAL.....	6
2. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE MULTIESCENARIOS PARA UNA BIORREFINERÍA EN BASE A BIOMASA DE MICROALGAS CON APLICACIÓN DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA COMO ETAPA DIFERENCIADORA	7
2.1. INTRODUCCIÓN	7
2.2. METODOLOGÍA	14
2.2.1. Aspectos técnicos del modelo.....	15
2.2.1.1. Microalgas evaluadas y preparación de inóculos (laboratorio) .	15
2.2.1.2. Medio de cultivo	16
2.2.1.3. Cultivo	16
2.2.1.4. Cosecha.....	17

2.2.1.5. Escenarios a evaluar (pretratamientos)	18
2.2.1.6. Procesamiento	22
2.2.1.7. Digestión anaerobia	23
2.2.2. Evaluación económica	25
2.2.2.1. Inversión	25
2.2.2.2. Costos unitarios y de operación	26
2.2.2.3. Ingresos	27
2.2.2.4. Tasa de descuento e indicador de rentabilidad económica	28
2.2.2.5. Tasa de retorno energético	28
2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
2.3.1. Presentación de los resultados	29
2.3.2. Análisis de sensibilidad	33
2.4. CONCLUSIONES	42
3. SELECCIÓN DE SITIOS DE CULTIVO DE MICROALGAS A ESCALA INDUSTRIAL EN CHILE	46
3.1. INTRODUCCIÓN	46
3.2. METODOLOGÍA	52
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
3.4. CONCLUSIONES	62
4. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES FINALES, JUNTO A RECOMENDACIONES Y APORTES.....	64
4.1. PRINCIPALES DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	64
4.2. PERSPECTIVAS PARA TRABAJOS FUTUROS	70
BIBLIOGRAFIA.....	72
A N E X O S.....	86
ANEXO A: Diagramas y algunos supuestos de la evaluación de los escenarios y otros detalles del modelo	87
ANEXO B : Peso de los factores estandarizados sobre NPV de <i>Isochrysis sp.</i>	103
ANEXO C: Peso de los factores estandarizados sobre EROI de <i>Isochrysis sp.</i>	104

ANEXO D: Mapa de Chile que grafica la superposición de los elementos empleados por la metodología de selección de sitio de cultivo del presente estudio	105
--	-----

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1: Estequiometría y rendimientos en la producción de biogás, propuestos en diversos estudios, dada la degradación de las principales macromoléculas	12
Tabla 2-2: Rendimientos teóricos y reales de la producción de biogás a partir de biomasa de microalgas	12
Tabla 2-3: Resultados de la evaluación energético-económica de los multiescenarios para la producción de biomasa de <i>Isochrysis sp.</i> empleando un sistema híbrido de cultivo.....	31
Tabla 2-4: Variables detectadas con mayor impacto potencial sobre el NPV y sometidas a análisis de sensibilidad	35
Tabla 2-5: Definición de los contextos a comparar luego del análisis de sensibilidad.....	38
Tabla 3-1: Extensiones de terreno necesarias para sostener diversas escalas de producción de biodiesel.....	50
Tabla 3-2: Estudios identificados sobre la selección de sitio de cultivo de microalgas y aprovechamiento de recursos diversos	51
Tabla 3-3: Superficies analizadas con potencial para el cultivo de microalgas a alta escala en Chile, los resultados se representan gráficamente en la Figura 3-2.....	57

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2-1: Resumen gráfico, presentado a <i>Algal Research</i> , sobre la evaluación de multiescenarios de una biorrefinería en base a microalgas	7
Figura 2-2: Estimaciones de mínimo precio de venta de litro de biodiesel de microalgas (OP=open ponds, FBR=fotobiorreactor y Hybrid=combinación de tecnologías)	10
Figura 2-3: Esquema general de la producción y procesamiento de microalgas a través de una biorrefinería contemplado por el modelo de evaluación del presente estudio	15
Figura 2-4: Diagrama conceptual del pretratamiento de transesterificación <i>in situ</i> con sus respectivos flujo y operaciones unitarias involucradas	21
Figura 2-5: Esquema conceptual de la DA modelada.....	24
Figura 2-6: Comparación de los costos de inversión y operación totales de la planta según la tecnología de cultivo seleccionada.....	30
Figura 2-7: NPV vs EROI para todos los escenarios evaluados en base a promedio de escalas de producción.....	31
Figura 2-9: Gráficos especie específica para la composición de la inversión según promedio de escenarios y escalas de producción de microalgas mediante cultivo híbrido	33
Figura 2-10: Gráficos especie específica para la composición de los costos operacionales según promedio de escenarios y escalas de producción de microalgas mediante cultivo híbrido.....	34
Figura 2-11: Composición de la biomasa de las microalgas consideradas en el modelo	37
Figura 2-12: Precio mínimo de venta de biodiesel para escalas que presentan rentabilidad económica, escenarios más atractivos, especies de microalgas y contextos definidos por variables sensibilizadas.....	38
Figura 2-13: Gráfico del peso de los factores sensibilizados sobre el NPV para el cultivo híbrido a mediana escala de <i>Isochrysis sp.</i>	40
Figura 2-14: Gráfico del peso de los factores sensibilizados sobre el EROI para el cultivo híbrido a mediana escala de <i>Isochrysis sp.</i>	42
Figura 2-15: Ejemplo teórico de la visualización de los resultados de 2 alternativas o proyectos energéticos, más posibles compromisos país en la materia, luego de un análisis multidimensional estandarizado	45
Figura 3-1: Resumen gráfico, presentado a <i>Algal Research</i> , sobre selección de sitios de cultivo en Chile.....	46

Figura 3-2: Imágenes de los 10 sitios identificados en Chile con potencial para el cultivo de microalgas a escala industrial y que fueron sometidos a un análisis subsecuente sobre la pendiente (elevación) del terreno	58
Figura 4-1: NPV vs EROI de los mejores escenarios respecto de la línea de base para <i>Isochrysis sp.</i> de alta escala y considerando venta del biodiesel a US\$1.2/L	65
Figura 4-2: Gráfica asociada a un análisis de sensibilidad tradicional	68
Figura 4-3: Irradiación solar anual real vs teórica para diferentes ciudades y comparación con el caso real de Los Vilos	69

RESUMEN

La creciente demanda energética, la dependencia sobre los combustibles de origen fósil y los deficientes resultados (económicos, sociales y ambientales) de evaluaciones sobre la producción de biocombustibles tradicionales como etanol de maíz y biodiesel de soya, han llevado a la bioenergía a centrar su atención en fuentes de biomasa menos convencionales, como es el caso de los organismos unicelulares fotosintéticos conocidos como microalgas.

Respecto de la producción de biodiesel a partir de microalgas, se reporta en la literatura que su costo de producción (US\$4/L) es elevado respecto del precio internacional del diésel derivado del petróleo (US\$1/L), y que solo mediante la aplicación de una biorrefinería y/o una adecuada selección de sitios de cultivo, la rentabilidad económica de esta industria puede ser mejorada.

El presente documento de tesis fue dividido en cuatro capítulos. El primero de ellos incluye una introducción general sobre la bioenergía a partir de microalgas y una estructuración de la tesis. Por su parte, en el segundo, se evalúan diversos escenarios o configuraciones de una biorrefinería en base a microalgas. Luego en el tercero, se aplica una metodología para detectar localidades chilenas con alta potencialidad para el cultivo de microalgas. Y en el cuarto capítulo, se presentan discusiones y conclusiones finales, además de aportes y propuestas para posibles futuras investigaciones.

De los 11 escenarios evaluados para la biorrefinería, casi todos presentan rentabilidad económica negativa, menos el caso que considera extracción y comercialización de proteínas (US\$3/kg), en desmedro de la ganancia energética. Del análisis de sensibilidad realizado, fue posible generar contextos de evaluación y detectar las variables críticas que determinan la rentabilidad económica y energética. En un contexto de sensibilización optimista, es posible alcanzar un costo de producción de biodiesel de US\$1/L.

Por otra parte, analizando diversos elementos de la geografía, clima, irradiación solar, etc., se identificaron 10 sitios con potencialidad de cultivo de microalgas en zonas costeras del Norte de Chile. En su totalidad representan 103.600ha, las cuales bajo consideraciones conservadoras, podrían sostener una producción de 1,5MMm³/año de biodiesel y reemplazar un 17% del consumo anual de diésel del país.

Palabras Claves: Bioenergía; Biocombustibles; Biodiesel; Digestión Anaerobia; Sustentabilidad; NPV (*net present value*); EROI (*energy return on investment*); Escala industrial.

ABSTRACT

The growing demand of energy, the dependency on fossil fuels and the deficient results (economics, social and environmental) in the evaluation, of the production of traditional biofuels like corn ethanol or soy biodiesel, they have centered their attention on less conventional biomass sources like in the case of, unicellular photo synthetic organisms known as microalgae.

Regarding the production of biodiesel from microalgae, literature reports that it's cost of production (US\$4/L) is elevated in respect to the international price of diesel derived from petroleum (US\$1/L), and that only through the application of a biorefinery and/or an adequate selection of farming locations, the economic profitability of this industry might be improved.

The present thesis document was divided into four chapters. The first chapter includes an introduction to the production of bioenergy from microalgae and the general structuration of the thesis. Meanwhile, in the second one, diverse scenarios or configurations of a biorefinery, based on microalgae, are being evaluated. Then in the third one a methodology is applied to detect Chilean places with high farming potential. Finally in the fourth chapter, discussions and general conclusions are presented, besides contributions and proposals for possible future related investigations.

From the eleven scenarios evaluated for the biorefinery, almost all present negative economical profitability (in detriment of the energetic profit) except for the case that considers extraction and commercialization of the proteins (US\$3/kg). From the sensitivity analysis made, it was possible to detect and evaluate critical variables that determine the energy and economical profitability. In an optimistic sensibility context, it's possible to reach a microalgae biodiesel price of US\$1/L.

On the other side, analyzing diverse elements of the geography, weather, solar irradiation, etc., ten places were identified with farming potential of microalgae in the coastal areas of the North of Chile. In their totality they represent 103.600 hectares, which under conservative consideration could sustain a production of 1.5 MMm³/year of biodiesel and replace 17% of the annual consumption of diesel from the country. Which is equivalent to a 5% of annual energy imports reduction and energy security increasing.

Keywords: Bioenergy; Biofuels; Biodiesel; Anaerobic Digestion; Sustainability; NPV (net present value); EROI (energy return on investment); Industrial scale.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. INTRODUCCIÓN Y REVISIÓN LITERARIA

1.1.1. Energía y bioenergía

La generación y consumo de energía se han convertido en problemáticas de carácter mundial y multisectorial durante el transcurso de las últimas décadas. Proyecciones de organismos internacionales, afirman que el consumo mundial de energía aumentará en un 55% hacia el año 2040, impulsado principalmente por la apertura y desarrollo de los países no-OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) (EIA, 2013).

La composición de la matriz energética mundial está fuertemente marcada por la dependencia hacia los combustibles de origen fósil, los cuales representan un 86% de ella. El 14% restante se divide entre las energías renovables y nuclear (EIA, 2013).

En los últimos años, las energías renovables no convencionales (ERNC: eólica, solar, biomásica, geotérmica, mini-hidro y mareomotriz) han ganado participación en la matriz mundial, ocupando terreno antes cubierto por la energía nuclear. La energía eólica es la que más ha aumentado su generación, pasando de un 14% (en 2002) a un 39% (en 2012) (EIA, 2013) dentro de la composición de las ERNC. En segundo lugar se encuentra la generación por medio de biomasa, que para la misma década anterior aumentó su generación un 70% (EIA, 2013) -principalmente- gracias a la producción de biocombustibles diversos.

Para Chile el escenario es similar al contexto internacional, un 66% de su matriz corresponde a energía de origen fósil y el porcentaje restante se divide en una componente importante de energía hídrica y de renovables diversas. Proyecciones del Ministerio de energía, advierten un aumento de la demanda energética para las siguientes dos décadas, principalmente impulsado por el desarrollo de la industria minera del Norte del país (Del Campo, 2012; MinE, 2013). La bioenergía en Chile se desarrolla a través de combustión directa de residuos forestales y pequeños proyectos en

base a biogás. Por su parte, la producción, distribución y consumo de biocombustibles en el país es de carácter voluntario, siendo marginal su mercado en comparación con los combustibles derivados del petróleo. La creación de un marco regulatorio en torno al uso y producción de biocombustibles, podría ayudar al país a enfrentar los aumentos proyectados de demanda energética.

Sin embargo, es en el campo de la bioenergía donde se presenta una fuente de biomasa poco convencional y muy atractiva para Chile y el mundo. Las microalgas, tema central de la presente investigación, son una alternativa con potencialidad sustentable, capaces de sostener diversas rutas de producción de bioenergía y co-productos de alto valor comercial.

1.1.2. Microalgas

Las microalgas son organismos ubicuos, unicelulares y de metabolismo diverso. Por lo general son consideradas fotoautótrofos, organismos con la capacidad de transformar fotosintéticamente carbono inorgánico, CO_2 , en materia orgánica compleja (p.ej. lípidos, glúcidos y proteínas) (Andersen, 2005; Mata, Martins, & Caetano, 2010). De los metabolitos principales que acumulan, es posible generar diversos productos de carácter energético o comercial. El biodiesel de microalgas originado del proceso de transesterificación de los lípidos, suele ser el principal producto evaluado por la investigación científica, dada su directa aplicación sobre vehículos motorizados, reemplazando completa o parcialmente al diésel de origen fósil. Diversos estudios han determinado el precio mínimo de venta del litro de biodiesel de microalgas que rentabiliza económicamente la industria, reportando un valor cercano a los US\$4/L (Bravo & Sáez, 2012; Davis, Aden, & Pienkos, 2011; Delrue et al., 2012; NREL - DOE, 2008; Pienkos, 2008; Sun et al., 2011), el cual es un valor muy lejano al del diésel internacional derivado del petróleo, US\$1/L (GlobalPetrolPrices, 2015).

Aún son necesarios mayores avances en el campo de estudio de las microalgas, principalmente en torno a la ingeniería celular y de procesos, para que sus biocombustibles o productos bioenergéticos encuentren una rentabilidad económica viable (Georgianna & Mayfield, 2012).

1.1.3. Biorrefinería

Los valores del precio mínimo de venta del litro de biodiesel de microalgas mencionados en la sección anterior, se obtienen del empleo de tecnologías tradicionales según el estado del arte de esta industria. Sin embargo, existen otras formas de producción de biodiesel menos tradicionales, o incluso alternativas diferentes de valorización de la biomasa, alcanzables por medio de la operación de una biorrefinería.

Una biorrefinería es una planta o fábrica química que integra el concepto de “cero desecho”, donde todas las fracciones de la biomasa (proteínas, glúcidos y lípidos) sean aprovechadas para generar distintos tipos de productos y energía (Chisti, 2007; Mussgnug, Klassen, Schlüter, & Kruse, 2010; Spolaore, Joannis-Cassan, Duran, & Isambert, 2006).

El concepto de biorrefinería aplicada al campo de las microalgas, ha generado interés y expectativas, dado que el aprovechamiento paralelo de las fracciones de la biomasa podría permitir obtener mayores ingresos económicos y valorización energética.

En los modelos conceptuales donde se describe una biorrefinería, suele considerarse la digestión anaerobia (DA) como una etapa de valorización final de la biomasa y transformación en energía (Bohutskyi & Bouwer, 2013).

1.1.4. Digestión anaerobia (DA)

La DA es una tecnología “madura”, ya que en la actualidad se reconocen diversas aplicaciones económicamente rentables que incluyen el tratamiento de residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios, aguas servidas y residuos agroindustriales. Es desarrollada por consorcios microbianos, donde participan tanto especies aerobias como anaerobias que llevan a cabo 4 etapas principales de degradación de la materia orgánica: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis (acetoclástica y reductiva).

Durante la última década, la degradación de microalgas por medio de DA ha sido ampliamente estudiada a nivel de laboratorio, donde se han obtenido datos respecto de: a) los rendimientos de la producción de biogás a partir del total o una fracción de la biomasa procesada, b) casos especiales y limitantes asociadas al uso de microalgas, y c)

los parámetros operacionales (tiempo de retención hidráulico (TRH), temperatura, velocidad de mezcla, entre otros) que optimizan la DA para distintos tipos de residuos (Alzate, Muñoz, Rogalla, Fdz-Polanco, & Pérez-Elvira, 2012; Bohutskyi & Bouwer, 2013).

1.1.5. Potencialidad de la industria de microalgas para Chile

Chile se caracteriza por ser un país de baja seguridad energética, posee niveles altos de importación de energía y una baja explotación de materias primas para la producción propia de combustibles (MinE, 2013). Los cambios en el mercado internacional del petróleo o las variaciones de precio del gas natural distribuido por sus vecinos, tienen fuertes impactos sobre la economía local. Debido a esto, la búsqueda de recursos naturales que permitan incrementar la producción nacional de energía -como nuevas fuentes de biomasa para la producción de biocombustibles- es una tarea fundamental para cualquier lineamiento o política energética a largo plazo.

El país posee un potencial productor limitado de fuentes de biomasa destinada a biocombustibles tradicionales. Teóricamente, solo se podría suplir el 2% de la demanda nacional de gasolina mediante la producción de etanol a partir de maíz y un 5% de la de diésel gracias al cultivo de raps (Ávalos, 2011). Estos porcentajes se explican a partir del análisis territorial, donde solo un 21% de la superficie total puede poseer uso agrícola, y de la cual solo un 8% es arable o cultivable (1.266.000ha, equivalentes al 1,7% del territorio nacional) (FAOSTAT, n.d.).

Comparándose con otros países de la región (p. ej. Argentina y Brasil), el potencial productivo de biocombustibles tradicionales de Chile es muy bajo, lo que hace particularmente atractiva la evaluación de un recurso renovable y con potencialidad local como las microalgas.

1.1.6. Estructura general de la tesis

La presente sección (Capítulo 1), describe de forma general y resumida el trabajo completado en los dos artículos científicos desarrollados a lo largo del Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería en el Departamento de Ingeniería Química y

Bioprocesos de la Pontificia Universidad Católica de Chile, según formato especial propuesto por la Dirección de Investigación e Innovación de Postgrado de la Escuela de Ingeniería (DIPEI).

El capítulo siguiente y núcleo central de la presente tesis (Capítulo 2), consiste en el artículo titulado “Evaluación económica de multiescenarios para una biorrefinería en base a biomasa de microalgas con aplicación de la digestión anaerobia como etapa diferenciadora”, cuyo borrador espera ser enviado a la revista *Algal Research* de Elsevier antes que finalice el año 2015. En él, se entrega el contexto y resultados propios de un modelo de evaluación económica sobre diversos escenarios de una biorrefinería. La modelación se llevó a cabo en AnalyticaTM, recopilando datos de la revisión bibliográfica y de experimentos propios con microalgas realizados en el Laboratorio de Energías Renovables y Residuos del Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

En tercer lugar (Capítulo 3), muestra el artículo titulado “Selección de sitios de cultivo de microalgas a escala industrial en Chile”, cuyo borrador fue enviado a la revista *Algal Research* de Elsevier, el 09 de marzo de 2015, y aceptado el 17 de julio de 2015. En él, se evalúa el potencial de Chile para la producción de microalgas, en términos de su geografía, clima e infraestructura.

Finalmente, el presente documento concluye con una sección destinada a recordar los principales hallazgos y sugerir futuras investigaciones relacionadas a la producción de microalgas con fines bioenergéticos (Capítulo 4).

1.2. HIPÓTESIS

Mediante la evaluación de nuevos y múltiples escenarios para la operación de una biorrefinería en base a microalgas localizada en Chile, se espera encontrar mejoras significativas en la rentabilidad económica de la industria, respecto del empleo de tecnologías y procesos tradicionales definidos en el estado del arte.

1.3. OBJETIVOS

Alineado a la hipótesis, el objetivo general de esta tesis fue cuantificar la rentabilidad económica de distintos escenarios de una biorrefinería en base a microalgas, determinando su potencialidad para Chile y balance energético del proceso global. Además, se destinó un esfuerzo especial al estudio y evaluación de la DA como etapa final de valorización de los residuos orgánicos, intentando justificar su incorporación o eliminación del proceso productivo.

Objetivos específicos:

- a) Aportar información técnica sobre el escalamiento y evaluación de tecnologías de cultivo y procesamiento de biomasa de microalgas desde laboratorio hacia escala industrial
- b) Identificar las variables críticas que influyen sobre la rentabilidad económica de la producción de bioenergía a partir de microalgas
- c) Identificar sitios de cultivo en Chile donde se aseguren condiciones geográficas, ambientales y de infraestructura propicias para la producción de microalgas, permitiendo dimensionar el potencial del país respecto de este recurso

1.4. METODOLOGÍA GENERAL

- a) Buscar y organizar información sobre el estado del arte de las biorrefinerías y la DA, poniendo especial énfasis en su aplicación sobre la biomasa de microalgas. Estudiar la estructura y composición de un modelo de evaluación energético-económica del proceso global con un enfoque “desde la cuna a la puerta”
- b) Identificar los parámetros críticos del proceso por medio de un análisis de sensibilidad de la rentabilidad. Para esto se utilizó AnalyticaTM, programa específico para evaluaciones económicas y análisis de sensibilidad multidimensional
- c) Revisar literatura especializada respecto de la evaluación territorial sobre el cultivo de microalgas. Luego, emplear una metodología existente, ajustada al contexto chileno, para localizar sitios idóneos de cultivo y evaluar el potencial del país

2. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE MULTIESCENARIOS PARA UNA BIORREFINERÍA EN BASE A BIOMASA DE MICROALGAS CON APLICACIÓN DE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA COMO ETAPA DIFERENCIADORA

Cristián P. Bravo Fritz, César A. Sáez-Navarrete, Leandro A. Herrera Zeppelin y
Felipe J. Varas Concha

En este capítulo se presenta el borrador de artículo en español por enviar a la revista *Algal Research* de Elsevier.

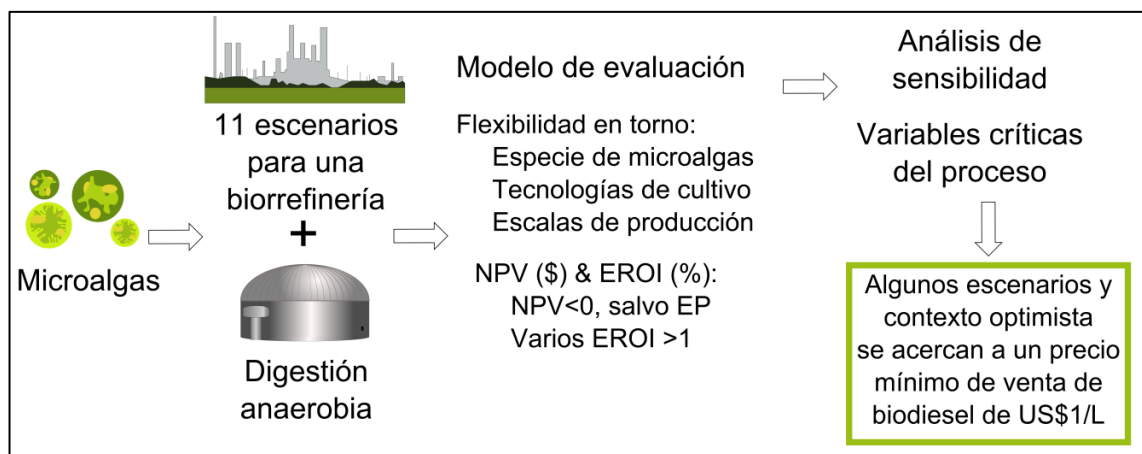


Figura 2-1: Resumen gráfico, presentado a *Algal Research*, sobre la evaluación de multiescenarios de una biorrefinería en base a microalgas

2.1. INTRODUCCIÓN

El consumo de energía mundial ha mantenido su crecimiento en los últimos años, principalmente impulsado por el desarrollo y apertura económica de los países emergentes (Brasil, Rusia, India y China). Proyecciones de la Energy Information Administration (EIA) informan que el consumo energético actual de los países no-OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) será duplicado en el año 2040, resultando en un aumento del consumo mundial de 529QBTU (QBTU = *Quadrillion British Thermal Unit*, 10^{15} BTU) (en 2012) a 820QBTU (proyección a

2040) (EIA, 2013). De esta forma, uno de los principales desafíos del siglo XXI será encontrar fuentes sustentables de energía capaces de sostener el escenario energético proyectado y estilo de vida de la sociedad contemporánea.

En la última década, el sector energético se ha sostenido mediante la explotación de recursos de origen fósil ricos en carbono, ya sean derivados del petróleo, gas natural o carbón. El porcentaje de la matriz energética mundial que representa la suma de dichas fuentes equivale a un 86%, el cual no ha variado en el transcurso de estos años (EIA, 2013).

La dependencia hacia los combustibles fósiles, tiene como consecuencia directa la emisión de gases de combustión hacia la atmósfera, principalmente en forma de CO₂. Dichas emisiones sobrepasan la tasa natural con que los ecosistemas del planeta capturan y fijan este compuesto, traduciéndose en una acumulación paulatina de CO₂ en la atmósfera (Ballantyne, Alden, Miller, Tans, & White, 2012; NOAA, 2015). Esta acumulación ha potenciado el efecto invernadero natural de la Tierra, incrementado la temperatura promedio del planeta (Barker, 2007; National Research Council, 2010).

Independiente del resultado o consecuencias originadas de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), existen dos conceptos que otorgan algo de seguridad al futuro incierto: prevención y diversificación de recursos. Para el sector energético, las energías renovables pasaron de un 7,5% del consumo energético mundial en 2002, a un 9% en 2012 (EIA, 2013), incremento debido principalmente a la mayor participación de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), las cuales triplicaron su generación, esencialmente a través del desarrollo de la energía eólica, solar y de biomasa (EIA, 2013).

Específicamente en el campo de la bioenergía es donde nace la motivación del presente estudio. Las formas tradicionales de bioenergía son la electricidad generada a partir de la combustión directa de biomasa o del biogás proveniente de la degradación anaerobia de la misma, y el uso de biocombustibles líquidos que desplazan completa o parcialmente a los derivados del petróleo (Bauen, Berndes, Junginger, Vuille, & Londo, 2009; Perlack et al., 2005). Entre los combustibles líquidos, el etanol suele ser producido a través de fermentación de materias primas ricas en glúcidos (o carbohidratos), como el maíz y la

caña de azúcar (Ahmed et al., 2011; Farrell et al., 2006), mientras que el biodiesel se obtiene a partir de la esterificación y transesterificación de los aceites usados y productos oleaginosos obtenidos de cultivos como la soya, raps canola, palma de aceite y otras semillas diversas (Ahmed et al., 2011; Chisti, 2007). No obstante, existe una alternativa menos convencional a considerar y evaluar en la industria bioenergética, esta es la biomasa obtenida de microalgas.

Si bien la investigación en el campo de las microalgas se incrementó en la última década, esta se remonta a mediados siglo XIX con su cultivo aislado a nivel de laboratorio (Andersen, 2005). Posteriormente, a finales de la década de 1970s el Departamento de Energía de EEUU crea una división llamada *Aquatic Species Program* (ASP) que opera hasta 1996, con el fin de investigar la viabilidad económica, el escalamiento a nivel piloto-industrial y la aplicación de diversas tecnologías sobre el cultivo y procesamiento de microalgas con fines bioenergéticos (Sheehan, Dunahay, Benemann, & Roessler, 1998). En la actualidad, su cultivo a escala industrial se restringe a la producción de alimento para la industria acuícola, o como fuente de metabolitos de alto valor económico (proteínas, aceites especiales o pigmentos antioxidantes) de interés farmacéutico (Rawat, Ranjith Kumar, Mutanda, & Bux, 2013).

La producción de bioenergía a partir de microalgas no sobrepasado las pruebas a nivel piloto, debido a sus altos costos de operación e inversión asociados. Diversos grupos de investigadores han evaluado el costo de producir biocombustible a partir de microalgas, determinando que el precio mínimo de venta del biodiesel debe bordear los US\$4/L con el fin de sostener el desarrollo económico de esta industria (ver Figura 2-2) (Bravo & Sáez, 2012; Davis et al., 2011; Delrue et al., 2012; NREL - DOE, 2008; Pienkos, 2008; Sun et al., 2011). Valor lejano a los US\$0,94/L de diésel según promedio mundial a inicios del 2015 (GlobalPetrolPrices, 2015).

Los resultados de las evaluaciones económicas sobre biodiesel de microalgas permiten entender que su producción a escala industrial será económicamente viable, solo si se generan productos de mayor valor comercial que los combustibles tradicionales. Lo que da nueva relevancia al concepto de biorrefinería, es decir, una planta o fábrica química que integra el concepto de “cero desecho”, donde todas las fracciones de la biomasa

(proteínas, glúcidos y lípidos) sean aprovechadas para generar distintos tipos de productos y energía (Chisti, 2007; Mussnug et al., 2010; Spolaore et al., 2006).

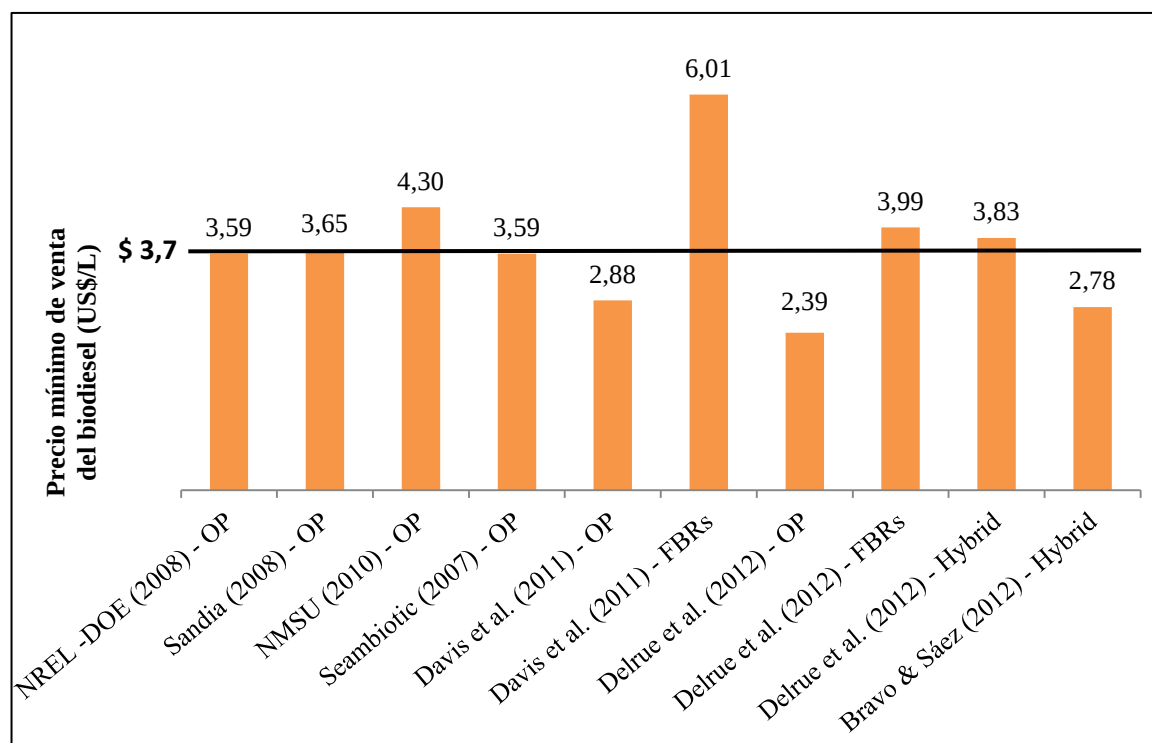


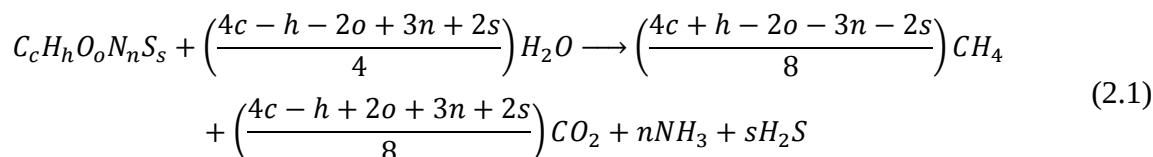
Figura 2-2: Estimaciones de mínimo precio de venta de litro de biodiesel de microalgas (OP=open ponds, FBR=fotobiorreactor y Hybrid=combinación de tecnologías)

En general, la biomasa de microalgas puede tener varios destinos bioenergéticos diferentes (Harun, Singh, Forde, & Danquah, 2010), por lo que es necesario poder evaluar y conocer las múltiples configuraciones de procesos que componen una biorrefinería para entregar un diseño sostenible a escala industrial.

En los modelos conceptuales donde se describe una biorrefinería, suele aparecer la digestión anaerobia (DA) como una etapa de valorización final de la biomasa, complementaria al proceso principal, que permite su transformación en energía (Bohutskyi & Bouwer, 2013). Por ejemplo, si el objetivo es producir biodiesel, la DA se debiera realizar al final del proceso, degradando el glicerol, glúcidos o proteínas residuales. En otros casos, cuando el objetivo principal es la producción de energía

eléctrica, se suele evaluar una única operación unitaria de valorización energética, ya sea por medio de generación de biogás con DA o de combustión directa (Harun et al., 2011). Durante la última década, se ha experimentado la DA de diversas especies de microalgas para poder determinar: a) los rendimientos empíricos de la producción de biogás a partir del total o una fracción de la biomasa procesada, b) casos especiales y limitantes asociadas al uso de microalgas, y c) los parámetros operacionales (tiempo de retención hidráulico (TRH), temperatura, velocidad de mezcla, entre otros) que optimicen la DA (Alzate et al., 2012; Bohutskyi & Bouwer, 2013). En la actualidad solo se tiene evidencia de escasas plantas a escala piloto de DA de microalgas (Petrick et al., 2013).

El rendimiento de la biomasa de microalgas en la generación de biogás puede ser determinado experimentalmente o mediante procedimientos teóricos, que permiten estimar la cantidad y composición del biogás, a partir de un residuo en particular con fórmula química elemental conocida (CHONS). Una fórmula estequiométrica fue propuesta por Buswell & Mueller en 1952 (Buswell & Mueller, 1952):



Es necesario mencionar que esta fórmula teórica suele sobrestimar la producción de biogás, aproximadamente en un 40% (Petrick et al., 2013). No obstante, esta fórmula resulta de ayuda para entender qué ocurre al interior de los biodigestores y permite generar un primer dimensionamiento del proceso global.

Dado que la DA comienza con la hidrólisis de polímeros complejos o macromoléculas - glúcidos, proteínas y lípidos (fórmulas químicas elementales en Tabla 2-1)- hacia compuestos más simples, se ha propuesto abordar la producción de biogás a partir de la caracterización particular del residuo (en término de sus porcentajes de estas tres macromoléculas), con la finalidad de determinar su fórmula química elemental o CHONS (Petrick et al., 2013). La biomasa de microalgas también suele caracterizarse de la misma manera, lo que permitiría obtener rendimientos teóricos de generación de biogás y compararlos con las productividades experimentales reportadas. De esta forma se construyó la Tabla 2-2, que entrega la fórmula química elemental de distintas

microalgas y evidencia que la fórmula de Buswell & Mueller (1952) sobrestima la producción de biogás real.

Tabla 2-1: Estequiometría y rendimientos en la producción de biogás, propuestos en diversos estudios, dada la degradación de las principales macromoléculas

Polímero complejo	Fórmula estequiométrica	Buswell & Mueller (1952)	Feinberg (1984)	Weißbach (2009)	VDI guideline 4630 (2006)
(Metano) y Biogás, en Nm ³ /kgSV					
Lípidos	$C_{50}H_{87}O_6$	(0,98) 1,43	(0,82) 1,37	(0,96) 1,35	(1,0) 1,39
Proteínas	$C_{184}H_{350}O_{86}N_{33}S$	(0,52) 1,10	(0,39) 0,65	(0,40) 0,78	(0,48) 0,8
Glúcidos	$(C_6H_{11}O_5)_n$	(0,41) 0,83	(0,30) 0,50	(0,40) 0,79	(0,38) 0,75

Fuente: Elaboración propia a partir de (Bohutskyi & Bouwer, 2013; Lardon, Hélias, Sialve, Steyer, & Bernard, 2009; Petrick et al., 2013; Sialve, Bernet, & Bernard, 2009).

Tabla 2-2: Rendimientos teóricos y reales de la producción de biogás a partir de biomasa de microalgas

Especie de microalgas	Fórmula estequiométrica	Buswell & Mueller (1952)	Experimental	Razón Exp/Teórico
		(Metano) y Biogás, en Nm ³ /kgSV		%
<i>Scenedesmus sp.</i>	$C_{192}H_{348}O_{62}N_{26}P_2S$	(0,64) 1,08	(0,27) 0,44	(42%) 41%
<i>Chlorella sp.</i>	$C_{287}H_{543}O_{120}N_{33}S$	(0,59) 1,12	(0,35) 0,49	(59%) 44%
<i>Arthrospira maxima</i>	$C_{281}H_{485}O_{167}N_{51}P_2S$	(0,43) 1,03	(0,29) 0,48	(67%) 47%
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	$C_{10}H_{16}O_6N$	(0,47) 1,00	(0,39) 0,59	(82%) 44%
Microalga promedio	$C_{212}H_{399}O_{91}N_{33}S$	(0,55) 1,13	-	

Fuente: Elaboración propia a partir de (Bohutskyi & Bouwer, 2013). La microalga promedio que se menciona, es una microalga cuya composición consiste en 25% lípidos, 50% proteínas y 25% glúcidos.

Antes de abordar el diseño y evaluación económica de la DA de microalgas, se debe considerar y tener cuidado respecto de tres posibles variables inhibitorias del proceso, que son específicas a las características de las microalgas: 1) tanto la composición de la pared celular y como el metabolismo específico de la especie tratada pueden ayudar a que las microalgas sobrevivan a las condiciones del reactor anaerobio (Mussnug et al.,

2010), 2) el contenido de proteínas (nitrógeno) de las microalgas, en conjunto con el pH del reactor, determinarán el equilibrio entre el amoníaco (NH_3) y ion amonio (NH_4^+), siendo el primero tóxico para los microorganismos metanogénicos e inhibitorio para el proceso en general (Y. Chen, Cheng, & Creamer, 2008; Sialve et al., 2009), y 3) el ion sodio (Na^+) presente en la humedad de la biomasa de especies marinas también puede ser un factor inhibitorio de la microflora anaerobia (P. H. Chen, 1987; Sialve et al., 2009).

Afortunadamente existen alternativas que permiten sortear o disminuir el efecto inhibitorio de cada una de estas características de las microalgas. Para evitar que las células se mantengan íntegras en los digestores, se puede anteponer una etapa de ruptura celular que favorezca la accesibilidad de las macromoléculas a los microorganismos encargados de desarrollar la hidrólisis (Alzate et al., 2012; Mussnug et al., 2010). De forma similar, el problema del nitrógeno se puede combatir con pretratamientos que cambien la razón C/N de la biomasa tratada (Bohutskyi & Bouwer, 2013; Sialve et al., 2009), extrayendo las proteínas de las microalgas o adicionando otros compuestos a degradar que sean ricos en carbono (co-digestión con papel o residuos agrícolas) antes de enviarlas a la DA (Petrick et al., 2013). Finalmente, la inhibición por NaCl puede ser remediada aclimatando, previa y paulatinamente, los inóculos anaerobios a mayores concentraciones de Na^+ antes de alimentarlos con microalgas, o tomando inóculos de ambientes naturales más tolerantes a las sales, como consorcios microbianos de fondos marinos o estuarios (Sialve et al., 2009).

Los pretratamientos aplicados a las microalgas sirven para evitar las inhibiciones de la DA, aumentando la exposición del contenido celular (biodegradabilidad), y en consecuencia pueden optimizar o incrementar la generación de biogás. Existen diversas alternativas de pretratamiento, entre las que destacan los métodos de naturaleza mecánica, térmica, química, biológica, eléctrica, por irradiación y combinaciones entre ellos (Bohutskyi, Betenbaugh, & Bouwer, 2014). Sin embargo, bajo el escenario de una biorrefinería, la biomasa llega a la etapa final de DA muy procesada, por lo que los factores inhibitorios antes mencionados ya no tendrán tanta relevancia en la producción de biogás.

Aún no existe consenso en cuál es el mejor pretratamiento aplicado a la DA de microalgas. Se requiere más investigación para ampliar la información en relación a un mayor número de especies de microalgas y combinaciones de tecnologías (Zamalloa, Vulsteke, Albrecht, & Verstraete, 2011). Sin embargo, los análisis de evaluación técnico-económica como el desarrollado en el presente estudio pueden ayudar a discriminar previamente algunas alternativas, ya que mediante la ingeniería de procesos y la evaluación del escalamiento industrial, se puede comparar la viabilidad de las distintas opciones de procesamiento, antes de invertir tiempo y recursos a nivel de laboratorio en busca de nuevas tecnologías.

2.2. METODOLOGÍA

El presente estudio, propone recopilar información suficiente para generar un modelo de evaluación económica que permita comparar el empleo de diferentes especies de microalgas y tecnologías de pretratamiento en la generación de energía y co-productos vía DA, con la generación de los principales productos por medio del procesamiento de la biomasa. Además, se persigue encontrar las variables críticas que determinan la rentabilidad económica del proceso, por medio de análisis de sensibilidad, y exponer la potencialidad efectiva de la DA aplicada a una biorrefinería.

Se comenzó revisando algunos estudios pre-existentes que evalúan de manera técnica y económica la producción de biodiesel y de biogás, a través de DA, de microalgas (Brentner, Eckelman, & Zimmerman, 2011; Collet et al., 2011; Delrue et al., 2012; Harun et al., 2011; Jonker & Faaij, 2013; Nagarajan, Chou, Cao, Wu, & Zhou, 2013; Pokoo-Aikins, Nadim, El-Halwagi, & Mahalec, 2010; Razon & Tan, 2011; Ribeiro & Silva, 2013; Zamalloa et al., 2011). Existen diferencias significativas entre los estudios consultados, ya sea a nivel de diseño del proceso de producción de microalgas o respecto de los resultados obtenidos (económicos, energéticos y emisiones de CO₂ equivalente asociadas).

Dado el gran número de opciones y variantes del proceso mencionadas en la literatura, el modelo inicia con la definición de un proyecto particular a evaluar, en el cual se especifican una a una las etapas principales del proceso (expuestas en la Figura 2-3).

El modelo propuesto evaluará el procesamiento de distintas especies marinas, desde su producción como inóculo a nivel de laboratorio, seguido por la obtención de un medio de cultivo específico, que será empleado en el escalamiento o producción a granel de las microalgas. Luego, la biomasa será sometida a la etapa de cosecha para obtener un lodo húmedo concentrado, destinado a las diversas alternativas de pretratamiento a ser evaluadas. Finalmente, se evaluará el procesamiento de la biomasa, tanto a través de la DA como de otras operaciones unitarias, las que permiten obtener energía y otros co-productos comercializables.

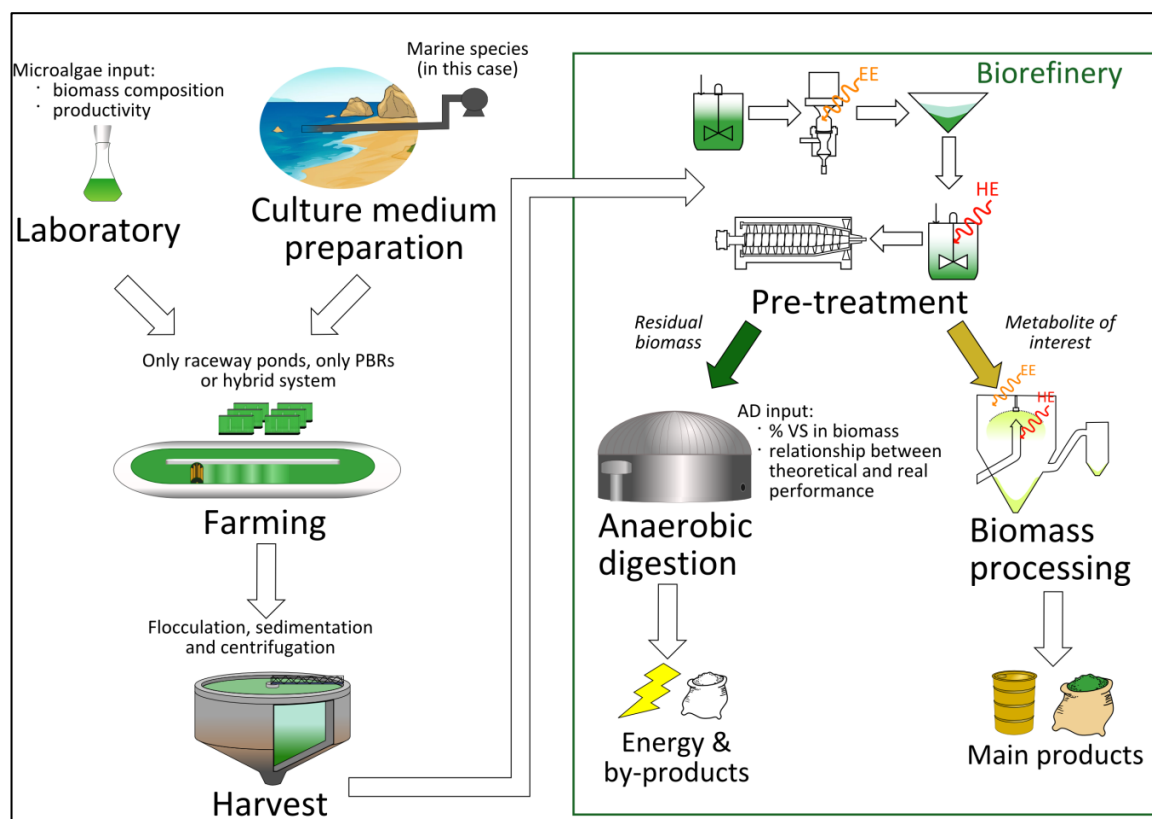


Figura 2-3: Esquema general de la producción y procesamiento de microalgas a través de una biorrefinería contemplado por el modelo de evaluación del presente estudio

2.2.1. Aspectos técnicos del modelo

2.2.1.1. Microalgas evaluadas y preparación de inóculos (laboratorio)

El modelo propuesto en esta investigación, permite evaluar la producción de diferentes especies marinas de microalgas, poseyendo originalmente información bibliográfica y

experimental -propia del grupo de investigación de Ingeniería Química y Bioprocesos- de *Tetraselmis sp.* (Asinari Di San Marzano, Legros, Naveau, & Nyns, 1982; Griffiths & Harrison, 2009; Mata et al., 2010) e *Isochrysis sp.* (Frigon et al., 2013; Mata et al., 2010; Phatarpekar, Sreepada, Pednekar, & Achuthankutty, 2000). Lo único necesario para evaluar una nueva especie, es conocer su productividad biomásica durante el cultivo y su composición elemental respecto de los porcentajes de lípidos, proteínas y glúcidos. También se podría evaluar el cultivo de especies de agua dulce, sin embargo sería necesario modelar y obtener información adicional respecto de la preparación y suministro del medio de cultivo específico que necesite dicha microalga. Además, el modelo contempla la construcción y operación de un laboratorio encargado de mantener un cepario de microalgas, preparar inóculos para iniciar el cultivo y realizar investigaciones afines.

2.2.1.2. Medio de cultivo

El modelo propuesto incluye los costos asociados al filtrado y bombeo, desde zonas costeras hacia la planta de cultivo, seguido por etapas de desinfección UV y almacenamiento. Específicamente, considera la producción de medio de cultivo f/2, dada su aplicabilidad a un extenso número de especies marinas, mezclando el agua de mar con nutrientes fundamentales (vitaminas, metales traza, nitratos y potasios) para el desarrollo de las microalgas (Andersen, 2005). Para la estimación del flujo diario de agua de mar a renovar, se consideran tanto las pérdidas por evaporación natural durante el cultivo (proceso de transferencia de masa entre la interfaz gas-líquido), según parámetros ambientales locales, como las pérdidas por humedad remanente posterior a la etapa de cosecha.

2.2.1.3. Cultivo

Como comentan Zamalloa et al. (2011), el cultivo de microalgas ha sido extensamente estudiado durante los últimos 40 años, permitiendo asumir diversos aspectos técnicos y económicos respecto de los fotobiorreactores (FBRs) y piscinas abiertas tipo *raceway ponds* (RWPs) (Benemann & Oswald, 1996; Michael a. Borowitzka, 1999; Richmond,

2004; Zamalloa et al., 2011). El modelo considera tanto el uso exclusivo de RWP's como de FBR's de placas planas para el cultivo, así como también una combinación entre ambas tecnologías, definida como sistema híbrido. La concentración máxima de microalgas alcanzable se definió en 1 y 5g/L para RWP's y FBR's (Richmond, 2004), respectivamente. Los FBR's se consideran bajo un régimen de aireación específica constante de $0,25L_{\text{aire}}/L/\text{min}$ (Gentile & Blanch, 2001; Richmond & Cheng-Wu, 2001; Richmond, 2004) y las RWP's serían agitadas mediante ruedas con paletas (*paddle wheels*), alcanzando el fluido una velocidad de 0,2m/s (Andersen, 2005; Richmond, 2004). Los días de cultivo en cada tecnología quedarían definidos según la productividad biomásica (en g/L/d) de cada especie evaluada, partiendo cada biorreactor desde una concentración inicial de 0,1g/L (Jiang, Luo, Fan, Yang, & Guo, 2011; Su et al., 2010) hasta el momento de la cosecha al alcanzar la concentración máxima. Este régimen define una producción por lotes (*batch*), que a su vez pretende disminuir el riesgo de contaminación del cultivo.

La cantidad de microalgas a producir determina el dimensionamiento total de la planta evaluada. El modelo entrega tres escalas preestablecidas, pequeña, mediana y alta (mayor a 2, 55 y 300ton/d en peso seco, respectivamente), y permite al usuario ingresar su propia dimensión de biomasa a producir. Estas escalas fueron definidas en base a las propuestas por Drapcho et al. (2008) para plantas industriales de biodiesel (Drapcho, Nhuan, & Walker, 2008), por lo que el modelo encierra una aproximación respecto de la biomasa de microalgas necesaria para sostener dichas escalas.

Para la localización de las plantas de cultivo, se toma como referencia el trabajo realizado por Bravo-Fritz et al. (2015), donde se encuentran sitios con potencialidad de cultivo de microalgas en Chile que aseguran productividades biomásicas mínimas (Bravo-Fritz, Sáez-Navarrete, Herrera Zeppelin, & Ginocchio Cea, 2015).

2.2.1.4. Cosecha

Cosecha, concentración o deshidratación, suelen ser términos referidos al proceso de extracción de las células de microalgas desde medio acuoso en que fueron cultivadas hacia las etapas posteriores de procesamiento. En el presente estudio se modeló la

cosecha como un proceso de cinco etapas secuenciales: bombeo desde cultivo, mezcla rápida (primer paso floculación), mezcla lenta (segundo paso floculación), sedimentación y centrifugación (C. Y. Chen, Yeh, Aisyah, Lee, & Chang, 2011; Molina Grima, Belarbi, Ación Fernández, Robles Medina, & Chisti, 2003; Singh, Nigam, & Murphy, 2011), que permiten aumentar la concentración de la biomasa en dos órdenes de magnitud.

El medio de cultivo recuperado a través de las distintas etapas de la cosecha, es recirculado (Lardon et al., 2009; Mao, Cao, Chen, Brennan, & Owende, 2013) hasta la etapa de desinfección UV, donde es mezclado con el agua de mar fresca para formar nuevo f/2. Esta configuración de operación requiere buscar medidas para contrarrestar la acumulación de salinidad en el medio originada por evaporación natural y reciclo. Dentro de algunas alternativas que se pueden evaluar, se encuentra el empleo de un caudal de purga destinado a piscinas de secado o el uso de atrapa de nieblas para diluir las sales.

2.2.1.5. Escenarios a evaluar (pretratamientos)

El lodo de microalgas, posterior a las centrífugas de la cosecha (75-80% de humedad), es destinado a las múltiples alternativas de pretratamiento evaluadas. A continuación se enumerarán y describirán brevemente (para mayor información consultar el Anexo A, donde se presentan más ejemplos como el propuesto en la Figura 2-4, donde cada etapa (íconos) incluye todos los parámetros a considerar en el diseño del dimensionamiento técnico, económico y energético):

- a) Línea de base (BL): Se emplea para poder tener un marco de comparación con todas las alternativas de pretratamiento, respecto de lo realizado tradicionalmente en la industria (*Business As Usual*). No requiere de tecnologías de pretratamiento.
- b) Digestión anaerobia directa (DAD) (Collet et al., 2011): Evalúa el destino directo del lodo de microalgas hacia la DA. En realidad esta alternativa tampoco se asocia a tecnologías de pretratamiento, sin embargo se incorpora en esta sección como un escenario de comparación con las otras alternativas (al igual que la BL).

- c) Extracción de proteínas (PE) (Barbarino & Lourenço, 2005; Garcia-Moscoso, Obeid, Kumar, & Hatcher, 2013; Ursu et al., 2014): Como se mencionó en la introducción, esta alternativa de pretratamiento responde a la necesidad de cambiar la razón C/N de la biomasa de microalgas antes de ingresar a la DA, para evitar inhibiciones por acumulación de NH_3^+ . Las proteínas son extraídas gracias a su solubilización en el medio y posterior decantación gracias a cambios en el pH. Para desarrollarse requiere de etapas de disrupción celular, separación de fases (proteínas solubilizadas del *debris* (residuo) celular), reactores de cambio de pH, separación de fases (proteínas de fracción hidrofílica) y deshidratación.
- d) Extracción de lípidos (LE) (Razon & Tan, 2011): Se decidió evaluar esta alternativa, dado que Harun et al. (2011) postulan que es posible obtener mayor energía de las microalgas aprovechando los lípidos para producir biodiesel y el resto de la biomasa para generar biogás (Harun et al., 2011). Esto es posible considerando las etapas de disrupción por ultrasonido, extracción por solvente de los lípidos, separación de fases (hidrofóbica del *debris* celular) y posterior destilación flash de los lípidos. El glicerol producido en la posterior transesterificación de los lípidos, es enviado a DA.
- e) Transesterificación *in situ* (TiS) (Bohutskyi & Bouwer, 2013; Ehimen, Connaughton, Sun, & Carrington, 2009; Ehimen, Sun, & Carrington, 2010; Ehimen, Sun, Carrington, Birch, & Eaton-Rye, 2011; Haas & Wagner, 2011; Halim, Danquah, & Webley, 2012; Levine, Pinnarat, & Savage, 2010; Sathish, Smith, & Sims, 2014) (ver Figura 2-4): En los últimos años, se ha mencionado que la transesterificación *in situ* puede ser la clave para la viabilidad económica de la industria bioenergética de microalgas (permitiendo reducir sus costos de producción) (Rawat et al., 2013; Sathish et al., 2014), sin embargo aún no se han desarrollado evaluaciones técnico-económicas de su escalamiento a nivel industrial. Además, se ha demostrado que la producción de biogás a través de la DA de los residuos de la TiS es posible (Ehimen et al., 2009), por lo que resulta interesante incorporarla como una alternativa de pretratamiento. Existen dos

tipos de TiS, definiéndose en base a la humedad inicial de la biomasa (seca y húmeda), ambas compuestas por operaciones unitarias diferentes. Para decidir cuál de estas opciones evaluar, se desarrolló un análisis técnico-económico preliminar de ellas, determinando que la TiS húmeda es más costosa que la seca (7 veces la inversión y 17 veces los costos operacionales) bajo técnicas descritas en el estado del arte. Como se puede ver en la Figura 3, las etapas que componen la TiS seca (Ehimen et al., 2010) incluyen una deshidratación inicial de la biomasa post-centrífuga, esterificación ácida, separación de fases (filtración del *debris* celular), separación de fases con extracción por solventes (fracción hidrofóbica de la hidrofílica), ruta hidrofílica: separación de fases (glicerol del agua y ácido sulfúrico) y destilaciones flash posteriores, y ruta hidrofóbica: deshidratación con sulfato de sodio anhídrido, separación de fases (filtración) y destilación flash del hexano.

- f) Co-digestión (CoD) (Bohutskyi & Bouwer, 2013; Ehimen et al., 2011; El-Mashad, 2013; Petrick et al., 2013; Salerno, Nurdogan, & Lundquist, 2009; Yen & Brune, 2007): Al igual que en la PE, la CoD se mencionó en la introducción como una alternativa para cambiar la razón C/N de la materia a degradar en la DA. Debido al alto contenido de proteínas en las microalgas, se debe mezclar el lodo con co-sustratos ricos en carbono como residuos de papel (Yen & Brune, 2007), *switchgrass* (El-Mashad, 2013), glicerol (Ehimen et al., 2011), soya (Salerno et al., 2009), entre otros. La razón de mezcla entre microalgas y co-sustrato, quedará determinada por la razón C/N deseada para la DA. En el modelo se asume una razón C/N óptima de 22,5 mezclando residuos de papel, ya que en el estudio realizado por Yen & Brune (2007), se concluye que debe estar entre 20-25 (Yen & Brune, 2007). Para la CoD, solo se necesita triturar los residuos de papel y mezclarlos con el lodo post-centrífuga antes de enviarlos a DA. La CoD es una alternativa combinable con otros pretratamientos.

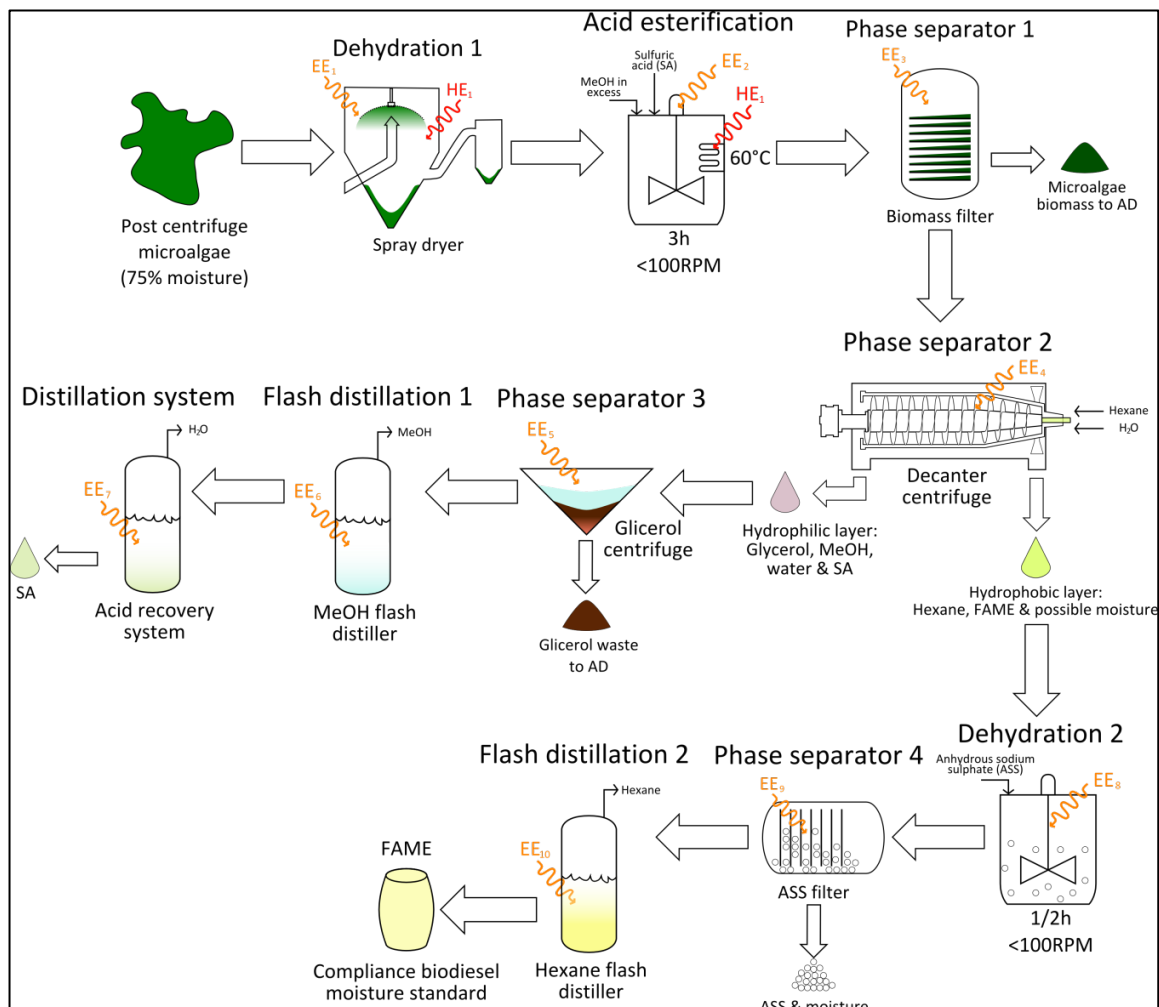


Figura 2-4: Diagrama conceptual del pretratamiento de transesterificación *in situ* con sus respectivos flujos y operaciones unitarias involucradas

g) Ruptura o disrupción celular (CDIsr) (Bohutskyi & Bouwer, 2013; Passos & Ferrer, 2015; Petrick et al., 2013; Samson & Leduy, 1983; Schwede, Rehman, Gerber, Theiss, & Span, 2013): Para evitar una posible sobrevivencia de las células de microalgas en los digestores y aumentar la exposición del contenido celular, se propuso pre-tratar el lodo con una tecnología de disrupción celular para aumentar la generación de biogás, específicamente con ultrasonido, operando a 30MJ/m^3 de lodo tratado (de Boer, Moheimani, Borowitzka, & Bahri, 2012; Schlatter, 2014). Dicho valor se asume constante para cualquier especie de microalga evaluada, reconociendo que en la realidad se debiera tener

información del consumo energético de la disrupción celular para cada especie según sus características fisiológicas. Samson & Leduy (1983) compararon la disrupción por ultrasonido con la termoquímica, siendo la primera más efectiva y menos tóxica para la microflora anaerobia (Samson & Leduy, 1983). A pesar de lo anterior, en los últimos años, el empleo de la disrupción termoquímica ha logrado resultados favorables respecto de la generación de biogás (Passos & Ferrer, 2015; Schwede et al., 2013). Este escenario es similar a la DA directa, salvo que se antepone a los digestores una etapa de disrupción celular.

Debido a que la CoD no es una ruta excluyente de la biomasa, esta alternativa de valorización puede ser combinada con los otros pretratamientos descritos. Generando de esta forma, los siguientes cuatro escenarios de evaluación:

- h) Disrupción celular seguida por co-digestión (CDisr+CoD)
- i) Extracción de proteínas seguida por co-digestión (PE+CoD)
- j) Extracción de lípidos seguida por co-digestión (LE+CoD)
- k) Transesterificación *in situ* seguida por co-digestión (TiS+CoD)

2.2.1.6. Procesamiento

Los pretratamientos generarán dos fracciones de biomasa diferenciables, aquella con destino a DA y la que se emplea para obtener otros productos de valor comercial. La segunda es la que alimenta el procesamiento, con el fin de obtener biodiesel, harina para alimentación animal de la industria acuícola y suplementos proteicos de microalgas. Solo los escenarios de BL, PE, LE, PE+CoD y LE+CoD se asocian al procesamiento de la biomasa.

- a) BL: Incluye etapas de deshidratación (llevar biomasa a 5% humedad), disrupción celular (*ball mills*) y separación de fases (lípidos del *debris* celular). Luego los lípidos son enviados al proceso de transesterificación para formar los metil ésteres (biodiesel) y el *debris* celular a empaquetamiento (*packing*) para ser comercializado como alimento animal.
- b) LE: Solo los lípidos extraídos son procesados, siendo enviados al proceso de transesterificación para producir biodiesel.

- c) PE: Las proteínas deben ser neutralizadas (pH 7), deshidratadas nuevamente (4-5% humedad) y enviadas a *packing* para cumplir estándares de comercialización como suplementos proteicos. Este tipo de producto, sería similar a los suplementos obtenidos de soya y leche (caseína).
- d) Transesterificación (Ma & Hanna, 1999; Van Gerpen, 2005): Los lípidos o triacilglicéridos, son sometidos a un proceso de transesterificación alcalina tradicional para producir metil ésteres (biodiesel o *FAME*). El proceso se compone de las etapas de pre-mezcla con reactivos (MeOH y NaOH), reactor de transesterificación con agitación y temperatura controlada, destilación flash, separación de fases (glicerol del biodiesel), reactor de neutralización y lavado, separación de fases o deshidratación (agua del biodiesel) y almacenamiento de biodiesel.
- e) *Packing*: Consiste en ensacado y posterior armado de pallets para comercialización.

2.2.1.7. Digestión anaerobia

El proceso de DA, se modeló como una tecnología de fermentación húmeda con capacidad de escalamiento, capaz de desarrollar cogeneración (*Combined Heat and Power* (CHP)) y aprovechar del digestato producido, según el esquema propuesto en la Figura 2-5.

Se optó por un esquema de dos digestores en serie, tipo reactor enterrado, aislados mediante hormigón y otro material impermeable en paredes y fondo, con un *biogas holder* en la parte superior (Biotecsur, n.d.; Petrick et al., 2013). Los reactores operarían con una tasa de alimentación promedio de 2,4kg SV/(m³·d) (Asinari Di San Marzano et al., 1982; Collet et al., 2011; Sialve et al., 2009), y de forma específica, el fermentador se mantendría a 35°C (mesofílico) (Song, Kwon, & Woo, 2004; Wu & Bibeau, 2006), agitación por intervalos en régimen de 3,5 h/d (Lemmer, Naegele, & Sondermann, 2013) y con un TRH de 19d. El post-fermentador, también se acondiciona para operar a 35°C (mesofílico), sin agitación, con un TRH de 11d y con decantación para generar una purga de digestato. La suma de ambos TRH, debe ser cercana a los 30d, número

definido en diversos estudios que evalúan la degradación óptima de microalgas en estado mesofílico (Gurung, Van Ginkel, Kang, Qambrani, & Oh, 2012; Nielsen & Heiske, 2011; Ras, Lardon, Bruno, Bernet, & Steyer, 2011; Samson & Leduy, 1983).

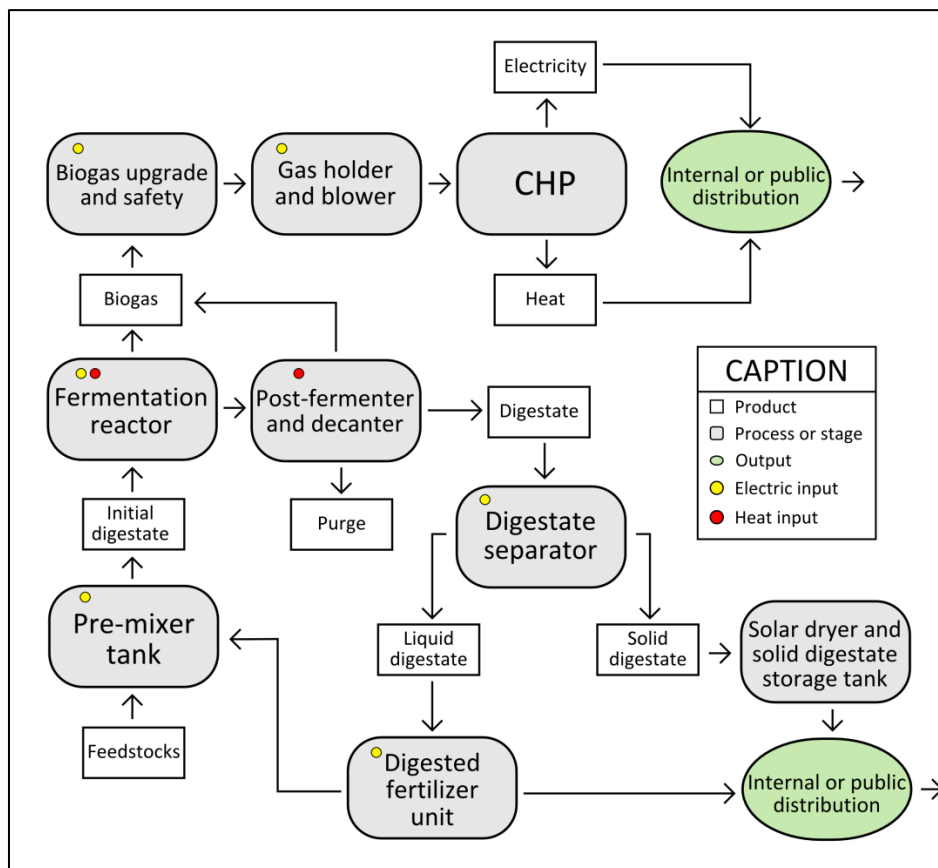


Figura 2-5: Esquema conceptual de la DA modelada

Fuente: Elaboración propia en base a (Akbulut, 2012; Pöschl, Ward, & Owende, 2010; Weiland, 2010)

El biogás generado en los reactores anaerobios ($5,5\text{kWh/m}^3$ de poder calorífico), estimado mediante la fórmula de Buswell & Mueller (1952) mencionada en la introducción (Buswell & Mueller, 1952), suele someterse a un proceso de deshidratación y desulfurizado (Weiland, 2010), antes de ser almacenado en un *biogas holder* con medidas de seguridad especiales. Un soplador induce el flujo de alimentación de biogás al sistema de CHP, donde la energía eléctrica (35%) y térmica (40%) generadas (Akbulut, 2012), pueden ser destinadas tanto a uso interno de procesos como a su comercialización.

El último producto generado en la planta bioenergética de microalgas, es el digestato proveniente de la DA. Existen equipos industriales, separadores de digestato (Akbulut, 2012), capaces de segregar las parte líquida (2% SV) de la sólida (25% SV). Una fracción de la líquida (21%) es recirculada al comienzo de la DA para ser mezclada con las microalgas de alimentación en el estanque de pre-mezcla; por su parte, el total de la fase sólida se envía a canchas de secado. Tanto el digestato líquido como sólido son productos ricos en nutrientes, por lo que pueden ser empleados como fertilizantes o mejoradores de suelos.

2.2.2. Evaluación económica

Se consideró un proyecto emplazado en el Norte Grande de Chile (Bravo-Fritz et al., 2015) con una jornada diaria de operación de 12,5h/d (7:00 a 19:30), que determina los turnos de trabajo y el personal necesario a contratar (capital de RRHH). La planta opera 360 días al año, parando solo para mantenciones coordinadas de equipos e instalaciones, durante 15 años (período de evaluación económica). Debido a que algunos costos fueron estimados a escala local, es necesario mencionar que el cambio de moneda local (CLP) a dólar estadounidense (US\$), equivale a 620CLP/US\$ en febrero de 2015.

2.2.2.1. Inversión

La inversión se realizará durante el transcurso de los dos primeros años, en función de los tiempos de construcción. Es dependiente de la microalga a producir, debido a que según la productividad y composición biomásica de cada especie, se tendrá un número distinto de FBRs y piscinas en operación.

Para el escalamiento de los costos de equipos, se ocupó una fórmula exponencial según capacidad de atributos específicos (Sinnott, 2005):

$$\frac{C_A}{C_B} = \left(\frac{E_A}{E_B} \right)^n \quad (2.2)$$

E_A : Escala del atributo del equipo conocida, E_B : Escala deseada a evaluar, C_A : Costo de inversión conocida, C_B : Costo deseado a estimar, n : Factor exponencial del escalamiento.

Los equipos de la biorrefinería deben instalarse al interior de una infraestructura acondicionada para su correcta y segura operación. En esta línea se asumió tres escalas de biorrefinería (2.000, 5.000 y 9.000m²) (Bravo & Sáez, 2012), construidas con un costo fijo por m² estimado a partir de información del Ministerio de Vivienda y Urbanismo para la categoría de construcción A2 (tipo galpón) (US\$353/m²) (Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MinVU), 2011; MinVU, 2001).

La inversión además considera algunos costos adicionales, tanto directos como indirectos, para cada una de las etapas del proceso de producción de microalgas (laboratorio, preparación de medio, cultivo, cosecha, pretratamiento, procesamiento y DA). Debido a la coordinación y sincronización que deben tener las operaciones unitarias entre sí, se necesita un sistema de control y monitoreo automático, el cual se asumió como un 10% de la inversión del subgrupo de equipos evaluado (Sinnott, 2005). Además, todo proyecto industrial debe considerar los costos indirectos de ingeniería, contratistas y contingencias, los que se asumieron como un 20, 5 y 10% de la inversión, respectivamente (Sinnott, 2005).

2.2.2.2. Costos unitarios y de operación

La operación de la planta evaluada, junto a sus costos asociados, comenzaría a partir del tercer año en adelante, dimensionados primordialmente por el nivel de producción. La energía y los reactivos son sin duda los principales componentes de los costos operacionales, para los cuales se asumen valores constantes durante todo el período de evaluación. La energía eléctrica, se estimó según contratos del Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) de Chile, en 0,1US\$/kWh (Comisión Nacional de Energía (CNE), 2014). Mientras que la energía calórica se definió gracias a los costos del vapor

de procesos y gas natural en Chile, en 0,04US\$/kWh (BP, 2014; Schlatter, 2014). Los precios de los reactivos empleados en las diversas operaciones unitarias dependen del producto a considerar y son tomados según análisis de mercado local.

La adquisición del terreno no se consideró como parte de la inversión, ya que un proyecto de estas características se podría desarrollar con un arriendo de superficie a Bienes Nacionales. El arriendo se estimó aproximadamente en 775US\$/(ha·año), ajustable según unidad de fomento (UF).

El capital humano es diverso y depende de la escala del proyecto. Se considera necesario contratar profesionales con formación universitaria (investigadores, ingenieros civiles, comerciales, contadores y abogados), técnica (administrativos, técnicos y operadores de plantas químicas) y no calificada (aseo y seguridad).

Se asume que todos los equipos de la planta deben ser sometidos a mantenciones periódicas para asegurar su correcto funcionamiento, generando así un gasto operacional anual asociado al mantenimiento, equivalente al 5% de la inversión original.

Por último, al igual que otros estudios de factibilidad técnica-económica, no se consideraron costos anuales por concepto de impuestos sobre la utilidad ni de intereses devengados del financiamiento (Zamalloa et al., 2011).

2.2.2.3. Ingresos

Los ingresos son dependientes del escenario evaluado, existiendo seis posibles productos comercializables: electricidad, calor, biodiesel, harina de microalgas, digestato y proteínas.

Tanto la energía eléctrica como la calórica, dependen del consumo interno de la planta, por lo que si se generan excedentes, estos pueden ser comercializados a los mismos precios mencionados en los costos. El biodiesel por otra parte, debe competir o comercializarse junto al diésel de origen fósil cuyo precio promedio mundial bordea 1US\$/L (febrero 2015) (GlobalPetrolPrices, 2015). Sin embargo, el precio de venta del biodiesel que hace rentable la industria de microalgas es un indicador de costos que se obtiene mediante sensibilización.

Los otros productos de microalgas resultan ser menos tradicionales. Para las proteínas aisladas se asumió un valor similar a suplementos alimenticios derivados de la soya o leche, 3,25US\$/kg, y el precio de la harina para alimento animal (bivalvos, crustáceos y peces) se estimó en 0,1US\$/kg (Subhadra, 2010). Y finalmente, respecto del digestato líquido y sólido provenientes de la DA, se asumió en un 80% su comercialización a 0,9 y 8US\$/ton (Lantz, 2012; Waste & Resources Action Programme (WRAP), 2009), respectivamente.

2.2.2.4. Tasa de descuento e indicador de rentabilidad económica

La tasa de descuento (dr) no fue única, sino que se sensibilizó en torno a ella escogiendo distintos porcentajes asociados a sectores que podrían interesarse en un proyecto como éste. Específicamente se definieron cuatro tasas, para calcular la rentabilidad económica del proyecto (*net present value*, NPV), social (3%) y privadas con riesgo bajo (8%), medio (14%) y alto (20%).

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{(Income - Cost)_t}{(1 + dr)^t} \quad (2.3)$$

2.2.2.5. Tasa de retorno energético

Con la finalidad de no perder el objetivo de producir energía a partir de las microalgas (Brentner et al., 2011), se puede calcular la tasa de retorno energético (*energy return on investment*, $EROI$) de todos los escenarios evaluados, mediante la siguiente fórmula (Hall & Klitgaard, 2012):

$$EROI = \frac{\text{Energía entregada a la sociedad}}{\text{Energía requerida para producir la energía entregada}} \quad (2.4)$$

De esta forma, a pesar de que pueda existir rentabilidad económica que promueva al desarrollo de la alternativa de pretratamiento evaluada, siempre se podrán comparar desde la perspectiva energética y evaluar su efectividad.

2.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1. Presentación de los resultados

El modelo construido posee tantas dimensiones y escenarios posibles, que sería imposible presentar al lector todos los resultados sin un filtro preliminar o un enfoque estratégico respecto de su adecuada visualización.

En primer lugar, los resultados permiten desarrollar un análisis en torno a qué tecnología de cultivo conviene más utilizar. Las alternativas evaluadas consistieron en el empleo exclusivo de FBRs, RWP, o una combinación de ambas opciones definida como sistema híbrido donde los FBRs aporten el inóculo necesario de las RWP. Mediante FBRs se pueden alcanzar mayores concentraciones de biomasa, por lo que su elección implicaría un menor consumo de medio de cultivo, disminuyendo indirecta y principalmente los costos de bombeo, preparación del f/2 y cosecha. Las piscinas por su parte, consumen menos energía durante el cultivo y su costo de construcción volumétrico unitario debiera ser menor.

Obteniendo promedios entre todos los escenarios evaluados y escalas de producción consideradas en el modelo, se presentan los siguientes gráficos de barras (ver Figura 2-6) para la inversión y costos operacionales según tecnología de cultivo empleada. Tiene sentido comparar el cultivo entre escenarios, debido a que es una etapa previa a la diferenciación. En otras palabras, todos los escenarios comparten los mismos costos de cultivo y se diferencian posteriormente según el tratamiento que se le dará a la biomasa post-cosecha.

Como se puede apreciar en la Figura 2-6, utilizar solo FBRs implicaría una inversión casi 3 veces superior al empleo de las otras tecnologías y unos costos operacionales en promedio 37% más altos. La utilización exclusiva de FBRs se podría haber justificado si sus costos operacionales hubiesen sido menores a los asociados a las RWP y así se podría haber obtenido un impacto positivo sobre la rentabilidad económica. Lamentablemente dicha situación no se pudo obtener de la modelación, lo que permite descartar el uso exclusivo de FBRs del análisis futuro.

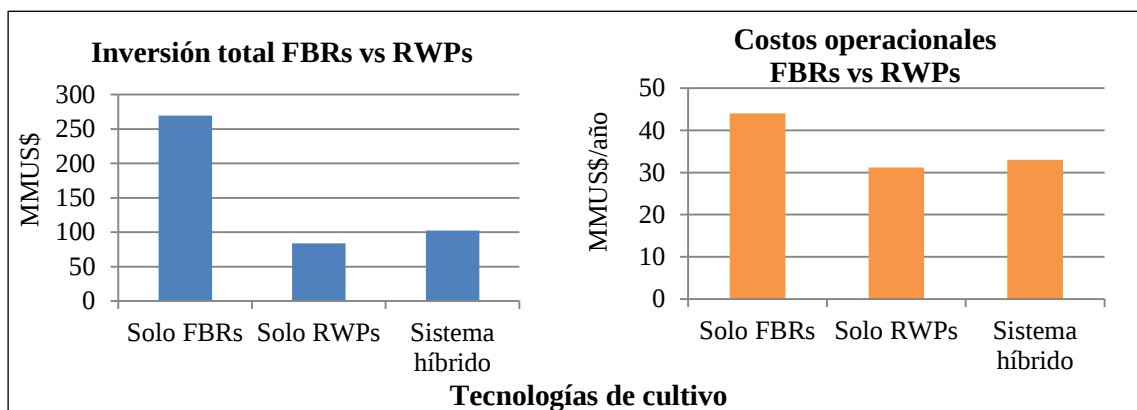


Figura 2-6: Comparación de los costos de inversión y operación totales de la planta según la tecnología de cultivo seleccionada

Sin embargo, los FBRs poseen una ventaja no evaluada o cuantificable en el modelo, que es la aislación del cultivo respecto del medio ambiente para disminuir el riesgo de contaminación. Dicha característica, sumada al hecho de que los costos entre el uso exclusivo de RWP y del sistema híbrido son similares, permite discriminar entre las tecnologías de cultivo y presentar de ahora en adelante solo los resultados de la evaluación energético-económica para un sistema híbrido de producción de microalgas, donde los FBRs se emplearán como productores de inóculo y las RWP como tecnología principal de cultivo y escalamiento.

Como se puede apreciar en la Tabla 2-3, todos los escenarios poseen rentabilidad económica negativa ($NPV < 0$) salvo los que consideran PE de mediana y alta escala, tanto individual como acompañada de CoD. Este era un resultado esperable, dado que el estado del arte considera la producción de microalgas a nivel comercial si su destino es la alimentación animal u obtención de metabolitos específicos de alto valor como las proteínas destinadas a suplementos alimenticios para humanos.

Respecto del EROI, si este indicador supera la unidad, se puede pensar que la alternativa evaluada entrega más energía a la sociedad que la que consume durante la obtención de sus productos, y en caso contrario, dicha opción podría considerarse energéticamente desfavorable. En la misma Tabla 2-3, se entregan los resultados del EROI para todos los escenarios evaluados.

Tabla 2-3: Resultados de la evaluación energético-económica de los multiescenarios para la producción de biomasa de *Isochrysis sp.* empleando un sistema híbrido de cultivo

Escenario	MM US\$												EROI (%)		
	Inversión			Costos operacionales			Ingresos			NPV con dr del 14%					
	Peq	Med	Alta	Peq	Med	Alta	Peq	Med	Alta	Peq	Med	Alta	Peq	Med	Alta
BL	3,47	36,53	165,41	0,96	9,73	44,82	0,24	6,25	34,01	-6,17	-46,32	-186,09	0,51	0,63	0,64
DAD	3,65	43,43	196,71	0,87	7,79	33,97	0,09	2,38	12,94	-6,58	-60,56	-257,41	0,56	0,73	0,77
PE	3,67	45,99	210,63	1,07	12,10	56,89	0,78	20,35	110,71	-4,38	0,56	77,54	0,18	0,20	0,21
LE	3,77	42,71	193,03	1,08	8,56	37,19	0,24	6,16	33,50	-7,00	-46,23	-174,98	0,86	1,92	2,06
TiS	3,96	45,61	208,06	2,32	44,07	230,97	0,22	5,72	31,12	-12,92	-214,37	-1091,98	0,65	0,79	0,81
CoD	3,94	49,14	222,46	0,97	9,72	44,03	0,16	4,09	22,27	-6,96	-65,94	-280,60	0,95	1,23	1,28
CDIsr	3,79	45,55	206,07	0,90	8,03	34,94	0,12	3,02	16,41	-6,73	-60,35	-253,06	0,73	0,95	1,00
CDIsr+CoD	4,14	52,39	236,90	0,97	9,89	44,84	0,20	5,18	28,21	-6,96	-64,19	-268,07	1,24	1,59	1,67
PE+CoD	3,96	51,63	236,05	1,03	12,26	58,77	0,84	22,05	120,00	-4,10	3,37	92,21	0,35	0,38	0,39
LE+CoD	4,08	48,95	221,20	1,03	8,78	39,38	0,31	8,02	43,62	-6,69	-43,35	-159,56	1,08	2,39	2,55
TiS+CoD	4,18	50,00	227,89	2,25	44,01	231,65	0,28	7,43	40,41	-12,50	-209,57	-1067,50	0,85	1,03	1,06

MM=million (10^6); NPV=net present value; dr=discount rate; EROI=energy return on investment; BL=baseline; DAD=direct anaerobic digestion; PE=protein extraction; LE=lipid extraction; TiS=in situ transesterification; CoD=co-digestion; CDisr=cell disruption

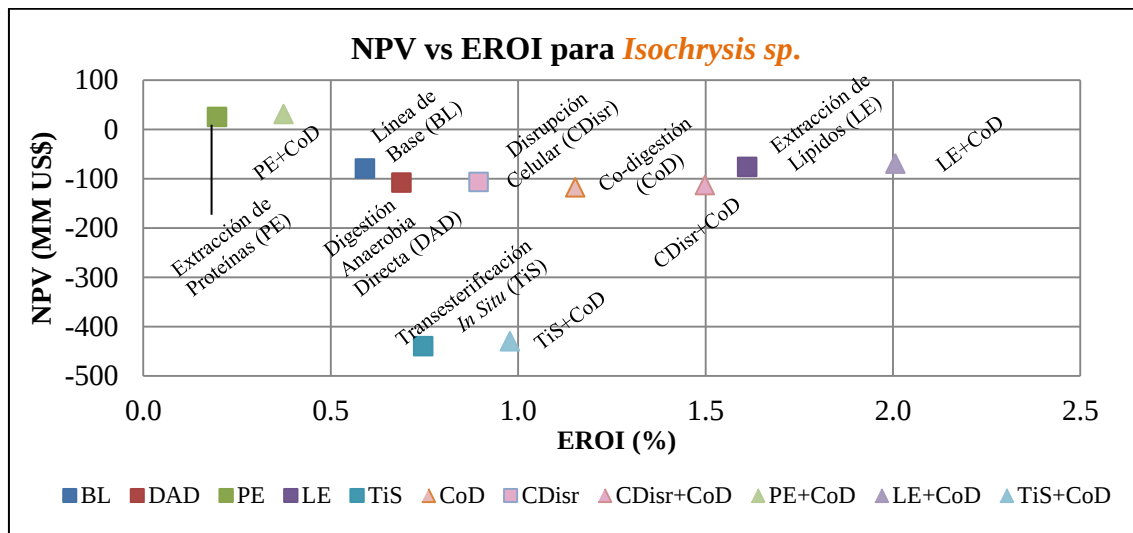


Figura 2-7: NPV vs EROI para todos los escenarios evaluados en base a promedio de escalas de producción

La Figura 2-7 muestra solo cuatro alternativas que presentan EROI favorable y ninguna de ellas es económicamente rentable. Solo los escenarios que consideran PE tienen NPV

positivo, sin embargo y contraproducentemente, son las peores alternativas desde el punto de vista energético. También se puede afirmar que la CoD es una alternativa que incrementa el EROI de cualquier pretratamiento al que se le acople, sin variar significativamente el NPV. Idealmente se esperaría obtener escenarios con combinaciones de NPV-EROI que se localicen sobre o cercanas al cero en el eje de las ordenadas y a la derecha de la unidad en las abscisas.

Como se puede apreciar también en el gráfico de la Figura 2-7, TiS es un escenario con una rentabilidad económica extremadamente negativa, valor que incluso distorsiona el gráfico en comparación a los valores de los otros escenarios evaluados. La TiS seca evaluada presenta unos costos operacionales demasiado altos que determinan un NPV excesivamente negativo. En todos los casos analizados, la TiS jamás se presentó como una alternativa económicamente viable o relativamente atractiva, por lo que su análisis futuro será bastante reducido y quedará descartada de las alternativas viables, esto bajo las tecnologías descritas y consideradas en su estado del arte y modelación.

Este estudio presenta los indicadores de NPV y EROI como dos herramientas para analizar el proyecto desde perspectivas independientes: económica y energética respectivamente. Sin embargo, es posible llevar el EROI a la evaluación económica incorporando resultados de una evaluación social de proyectos similares. Puede darse el caso, de que escenarios con un $EROI < 1$ o con valores no tan atractivos para la industria energética, debido al desplazamiento de combustibles fósiles generado, puedan entregar beneficios sociales superiores a los retornos económicos proyectados. El EROI tiene un reflejo en la evaluación económica, ambiental y social, porque la naturaleza del vehículo energético de entrada y de salida no es la misma. Por ejemplo, la generación eléctrica actual tiene un $EROI < 1$ debido a la segunda ley de la termodinámica y -sin embargo- la sociedad la acepta corrientemente, porque la utilidad de la electricidad es mayor a la del carbón, el diésel o el gas natural. Similarmente, si el biocombustible se puede producir consumiendo energías primarias de menor costo para la humanidad (eventualmente: calor solar, mareas, vientos, etc.), localizadas en o cerca del desiertos, dicho biocombustible se podrá producir porque la utilidad que presta es mayor que las formas de energía utilizadas como entrada al proceso. Es evidente que el costo de las energías

de entrada solo se puede determinar mediante estudios cabales, empleando herramientas de análisis de ciclo de vida del proceso, tratando de evitar la adopción de una simple idea sobre el tipo de energía que se está utilizando.

Debido a que la gran mayoría de los resultados presentaron $NPV < 0$, ahora se buscarán las variables críticas que influyan con mayor peso o fuerza sobre el NPV y EROI en cada uno de los escenarios y escalas evaluadas. La idea es encontrar configuraciones arbitrarias de dichas variables, por medio de un análisis de sensibilidad exhaustivo, que permitan rentabilizar económicamente alguno de los escenarios distintos a la PE.

2.3.2. Análisis de sensibilidad

Para poder desarrollar un análisis de sensibilidad robusto y significativo, primero se decidió analizar la composición de los costos (inversión y operación), con la finalidad de identificar las etapas del proceso productivo con mayor impacto promedio sobre el NPV y así definir posteriormente las variables y niveles a sensibilizar.

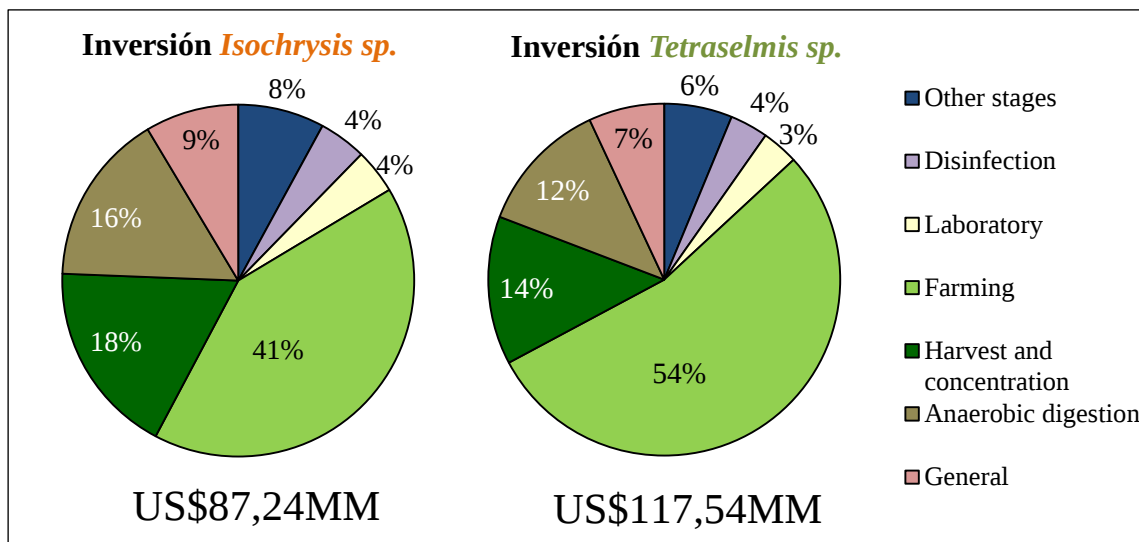


Figura 2-8: Gráficos especie específica para la composición de la inversión según promedio de escenarios y escalas de producción de microalgas mediante cultivo híbrido

De los gráficos de la Figura 2-9, es posible afirmar que los tres principales componentes de la inversión son el cultivo, la cosecha y la digestión anaerobia. La especie de microalga cultivada tiene un impacto directo sobre la inversión en etapa de cultivo, por lo que un segundo análisis permite visualizar que el porcentaje de lípidos de las

microalgas, la productividad biomásica y el costo de las tecnologías de cultivo, pueden ser variables de alto impacto en el análisis de sensibilidad, ya que permiten modificar la inversión en los tres principales componentes detectados.

Elegir correctamente la microalga a producir es un factor clave para alcanzar rentabilidad económica. Como se puede ver en la Figura 2-9, existe una diferencia importante en las inversiones empleando *Tetraselmis sp.* (35% superior) respecto del cultivo de *Isochrysis sp.* La diferencia en la estructura de costos empleando distintas microalgas, se debe principalmente a que el escalamiento es dependiente de un piso mínimo de obtención de los productos comercializables. Por ejemplo si el escenario considera la producción de biodiesel, al cambiar la microalga por otra con un porcentaje de lípidos diferente, cambiará la cantidad de piscinas de cultivo, sistemas de cosecha y equipos de procesamiento necesarios para obtener el volumen anual de biodiesel definido por dicha escala.

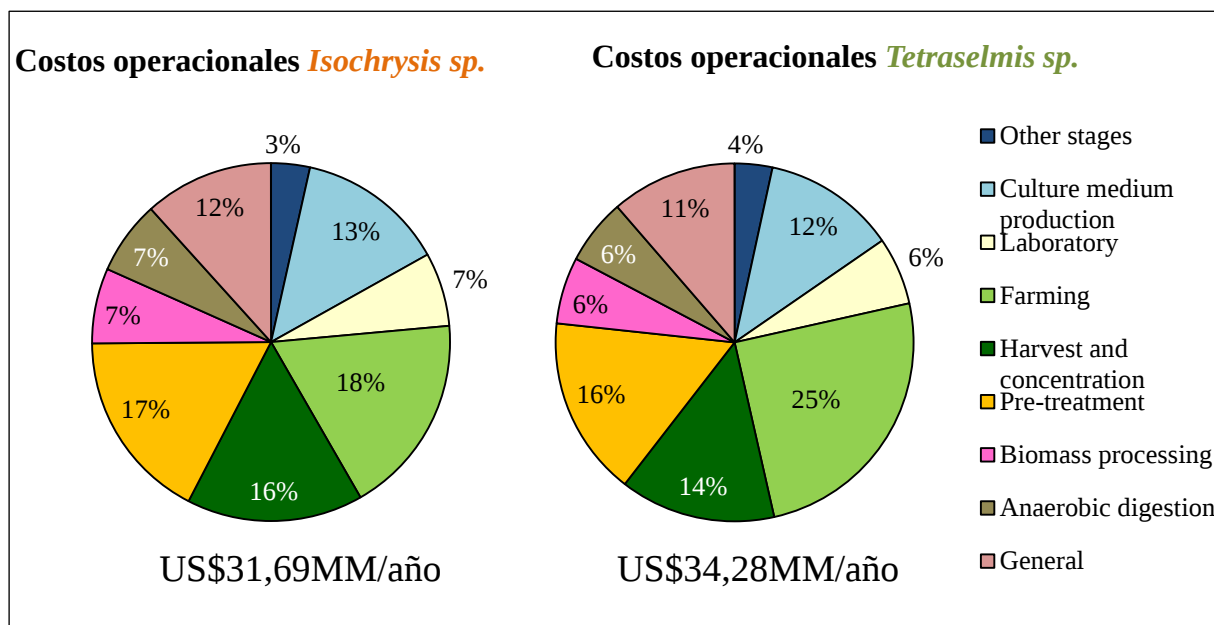


Figura 2-9: Gráficos especie específica para la composición de los costos operacionales según promedio de escenarios y escalas de producción de microalgas mediante cultivo híbrido

De los gráficos de la Figura 2-10, destacan cuatro principales componentes de los costos operacionales: preparación medio de cultivo, etapa de cultivo, cosecha y pretratamiento seleccionado. Las cuatro etapas mencionadas poseen un consumo de energía eléctrica

intensivo, por lo que para modificar los costos operacionales se podría sensibilizar la eficiencia energética de la planta, el costo de la energía, el porcentaje de lípidos y la productividad en las tecnologías de cultivo.

Así como en la inversión se analizó el efecto originado por la especie de microalga producida, en los costos operacionales dicha diferencia no es tan marcada o significativa (8% mayor para *Tetraselmis sp.*).

Sumando el precio de venta del biodiesel a las variables ya detectadas mediante la composición de los costos de inversión y operación (porcentaje de lípidos, productividad biomásica, costo de las tecnologías de cultivo, eficiencia energética de la planta y costo de la energía eléctrica), se espera poder modificar y sensibilizar también los ingresos. De esta forma se construye y presenta la Tabla 2-4, donde se exponen las variables a sensibilizar, junto a sus respectivos niveles de cambio considerados técnicamente factibles.

Tabla 2-4: Variables detectadas con mayor impacto potencial sobre el NPV y sometidas a análisis de sensibilidad

Variable	%Lipid ^a	Prod.CT ^b	\$CT ^c	%Effe ^d	\$EE ^e	\$BD ^f
Nivel	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$ inversión	$\Delta\%$ consumo	US\$/kWh	US\$/L
Bajo	-50%	-20%	-15%	-15%	0.05	0.8
Medio	0%	0%	-7.5%	-5%	0.1	1.1
Alto	+70%	+20%	0%	0%	0.15	1.4

- a) %Lipid = porcentaje de cambio de la composición de lípidos de la biomasa, el cambio porcentual aplica sobre los lípidos base de cada especie de microalga
- b) Prod.CT = productividad biomásica en tecnologías de cultivo, el cambio porcentual aplica sobre el valor de g/(L·d) tanto en RWPs como en FBRs
- c) \$CT = costo de inversión en tecnologías de cultivo, el cambio porcentual aplica sobre el valor total de la inversión en RWPs y FBRs
- d) %Effe = porcentaje alcanzado en eficiencia energética, el cambio porcentual aplica sobre la energía total consumida en la planta
- e) \$EE = costo de la energía eléctrica
- f) \$BD = precio de venta del biodiesel

Someter el modelo al análisis de sensibilidad antes descrito, implicó generar 10692 combinaciones y obtener la misma cantidad de resultados para NPV y EROI. Dentro de todos estos resultados, solo los escenarios que consideran PE y PE+CoD, para escalas media y alta de cualquier microalga, presentaron valores de NPV positivos. Luego, los escenarios BL, LE y LE+CoD, solo alcanzaron NPV positivo bajo condiciones específicas de la producción de *Isochrysis sp.*, dentro de las escalas media y alta. El resto de los escenarios (DAD, TiS, CoD, CDisr, CDisr+CoD y TiS+CoD) y el empleo de *Tetraselmis sp.* siempre tendrán rentabilidad económica negativa, bajo cualquier combinación posible de los niveles y variables sometidas a análisis de sensibilidad.

En base a lo anterior, la escala es un factor muy determinante para el NPV. Para pequeña escala, todos los escenarios y combinaciones de variables sensibilizadas son negativos, inclusive la PE. Ya desde escala media, el NPV comienza a ser positivo para algunos escenarios bajo combinaciones específicas de las variables sensibilizadas. En alta escala fue donde se obtuvieron los mejores resultados, lo cual tiene sentido, dado que el modelo considera economías de escala tanto para costos de inversión como de operación.

Por otra parte, la especie de microalgas considerada también es un factor relevante para la rentabilidad económica. La elección entre *Tetraselmis sp.* o *Isochrysis sp.*, puede determinar significativamente el atractivo económico de esta industria, explicado principalmente por la composición de la biomasa (ver Figura 2-11). Leves cambios en la composición de la biomasa, pueden significar el éxito o fracaso del negocio.

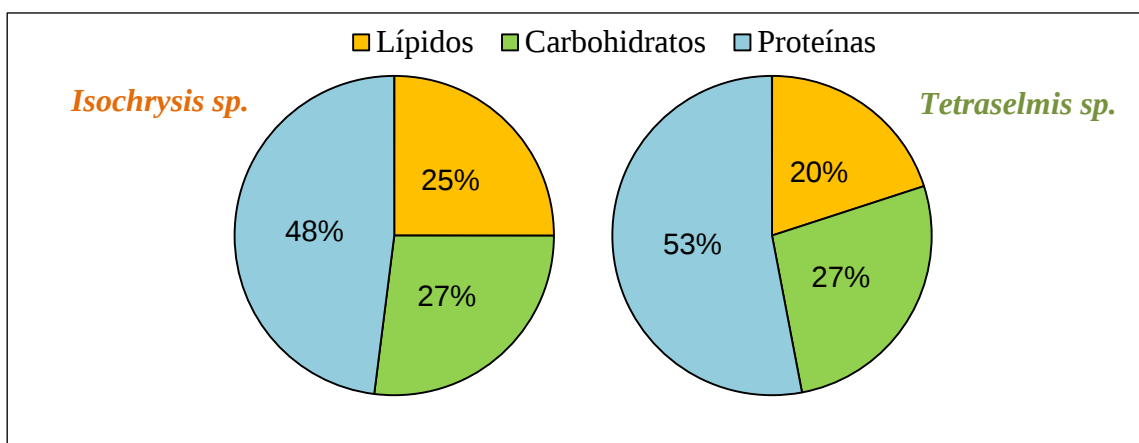


Figura 2-10: Composición de la biomasa de las microalgas consideradas en el modelo

Si bien aquí se presenta una comparación entre estas dos especies particulares, el modelo permite evaluar cualquier especie marina de microalga. Sin embargo, para analizar la producción de especies de agua dulce, se recomienda modificar los procesos y costos asociados a la preparación del medio de cultivo, asegurar un suministro local abundante de agua dulce y replantear la modalidad de bombeo hacia las tecnologías de cultivo, respecto de las consideraciones asumidas en el presente estudio.

Para resumir los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad, se definirán tres contextos o escenarios de combinaciones entre las variables sensibilizadas (ver Tabla 2-5). El primero es el “moderado”, donde todas las variables poseen valores conservadores respecto del estado del arte. En segundo lugar se definió el contexto de “intermedio (lípidos)”, que presenta valores similares al caso base, salvo por un cambio porcentual optimista respecto de la composición lipídica de la biomasa (+70%). Y finalmente se definió el “optimista”, que agrupa todos los niveles de sensibilización que favorecen la rentabilidad económica.

Tabla 2-5: Definición de los contextos a comparar luego del análisis de sensibilidad

Variable	%Lipid	Prod.CT	\$CT	%Effe	\$EE
Contexto	$\Delta\%$	$\Delta\%$	$\Delta\%$ inversión	$\Delta\%$ consumo	US\$/kWh
Moderado	0%	0%	0%	0%	0,1
Intermedio (lípidos)	+70%	0%	0%	0%	0,1
Optimista	+70%	+20%	-15%	-15%	0,05

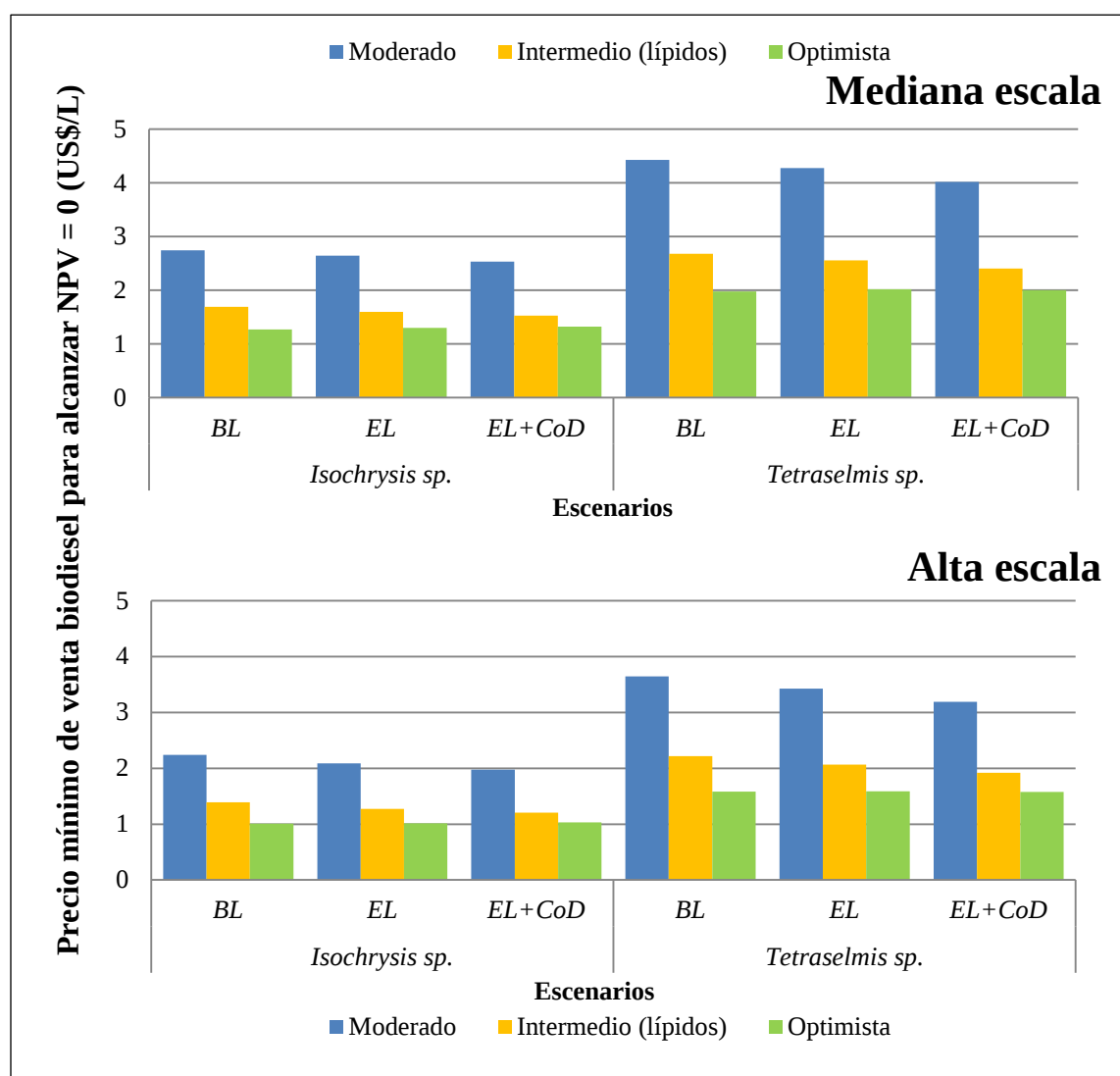


Figura 2-11: Precio mínimo de venta de biodiesel para escalas que presentan rentabilidad económica, escenarios más atractivos, especies de microalgas y contextos definidos por variables sensibilizadas

Un indicador muy utilizado es el precio mínimo de venta del biodiesel que rentabiliza económicamente la producción (NPV=0). Si se recuerda la información expuesta en la Figura 2-2, ahí se presentó un valor promedio de US\$3,7/L según datos recolectados de la revisión bibliográfica. Los gráficos de la Figura 2-12 se explican de esta misma forma, representando los principales resultados de los contextos del análisis de sensibilidad (moderado, intermedio y optimista), en términos del precio mínimo de venta de biodiesel, para los escenarios más atractivos desde un punto de vista económico (BL, LE y LE+CoD) y para ambas especies de microalgas.

De la Figura 2-12, se desprende que un cambio en el porcentaje de lípidos (%Lipid) en la biomasa, ya sea mediante un incremento (efecto del contexto intermedio) o cambio de microalga, refleja una importante disminución en el precio mínimo de venta del biodiesel. Específicamente en este contexto intermedio mencionado, se considera que la microalga aumenta su composición de lípidos en un 70%, lo que para *Isochrysis sp.* se traduce en alcanzar un 40% de lípidos en la biomasa. Sin embargo, esto no es suficiente para acercarse a valores competitivos respecto del diésel de origen fósil (US\$1/L). Para lograr esto se necesita una combinación de las variables clave definida según el contexto optimista, donde solo para *Isochrysis sp.* de alta escala, se obtuvo un valor de US\$1,01/L, tanto para BL como LE.

Gráficamente queda claro el importante efecto que tiene el %Lipid sobre el NPV en los 3 escenarios evaluados en la Figura 2-12, pero es difícil dimensionar el impacto paralelo que tienen las otras variables sensibilizadas. Por lo tanto, mediante un análisis estadístico se estudió el efecto sobre el NPV y EROI de todos los factores sensibilizados realizando un análisis de regresión considerando un modelo de efectos fijos. La Figura 2-13 resume parte de los resultados de dicho análisis (solo para mediana escala), mostrando el peso promedio de los factores o porcentajes asociados a cada una de las variables sensibilizadas para modificar el NPV. La Figura 2-13 también presenta una variable llamada Int.Fact., que representa la sumatoria de todos los efectos de interacción entre los factores. Sin embargo, dichos efectos de interacción suelen tener una baja participación (menores al 14%) en las variaciones del NPV. Debido a que los cambios en el peso de los efectos son muy sutiles entre escala y escala evaluada, se

originan gráficas muy similares. Por esta razón se decidió presentar el total de los resultados en la sección de Anexos del presente trabajo (NPV en Anexo B y EROI en Anexo C).

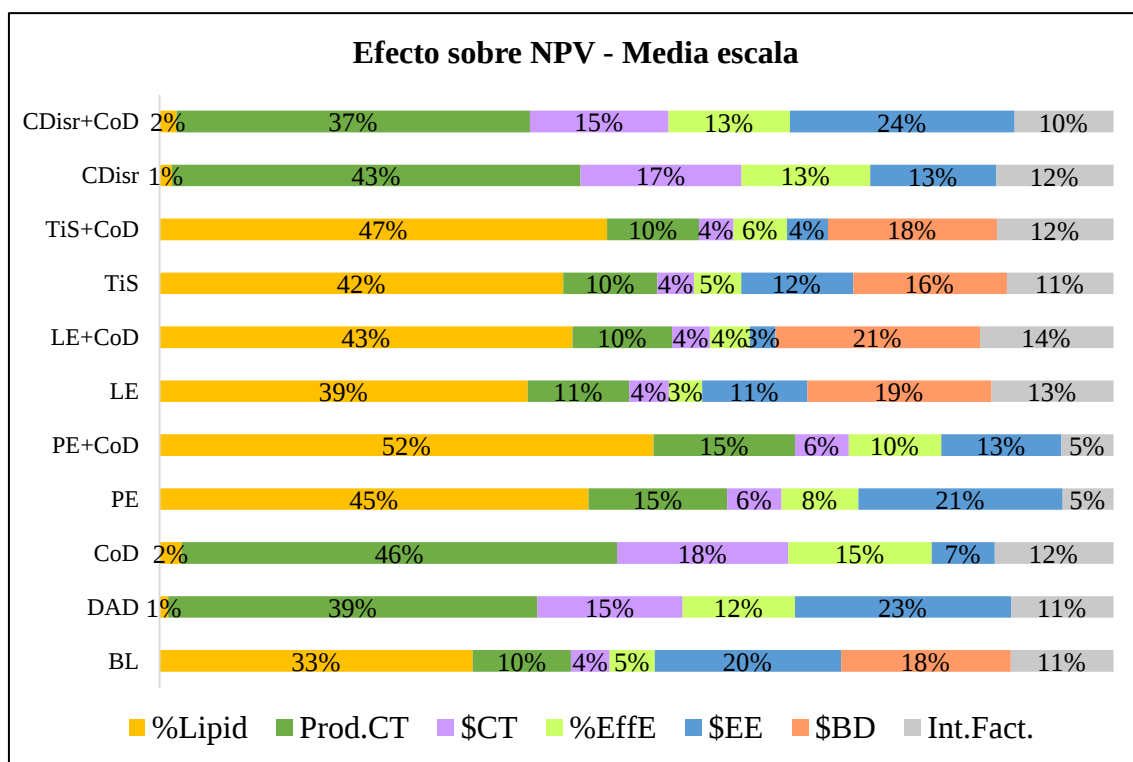


Figura 2-12: Gráfico del peso de los factores sensibilizados sobre el NPV para el cultivo híbrido a mediana escala de *Isochrysis sp.*

De la Figura 2-13, se puede corroborar que el %Lipid es el factor más relevante para los escenarios BL, LE, LE+CoD, PE y PE+CoD, seguido por el \$BD. Ambas variables están directamente vinculadas a la producción y comercialización del biodiesel producido, e indirectamente con la obtención de un volumen de proteínas diferente. Sin embargo, existe algo más interesante y que se deduce particularmente de este análisis. Dado que el %Lipid tiene mayor impacto sobre el NPV que el \$BD, esto permite pensar que subvenciones sobre el precio de venta o facilidades en distribución del biodiesel, son opciones menos atractivas que encontrar una nueva especie de microalga hiperacumuladora de lípidos o condiciones de cultivo que aseguren una mayor producción de aceites.

Por otra parte, el análisis de la Figura 2-13 permite indagar un poco más en los escenarios que no alcanzaron rentabilidad económica. Ya se comentó que TiS tiene unos costos operacionales que la hacen económicamente inviable, lo cual se extiende a TiS+CoD. Sin embargo respecto de DAD, CoD, CDisr y CDisr+CoD, se puede ver que la productividad biomásica de las tecnologías de cultivo (Prod.CT) es el factor con mayor influencia sobre el NPV, seguido por variables como \$TdC y %EffE. Por lo que para mejorar la rentabilidad económica de estos escenarios, los esfuerzos deben concentrarse en desarrollar mejoras sobre las variables antes mencionadas, superando los niveles propuestos en el análisis de sensibilidad. En estos escenarios, los factores %Lip y \$BD no influyen de manera significativa, dado que son escenarios que no comercializan biodiesel.

El efecto del precio de la energía eléctrica (\$EE) sobre el NPV es más parejo en todos los escenarios evaluados. Es posible explicar sus variaciones a través de los escenarios que dependen de tecnologías con un consumo intensivo de electricidad o que posean la EE como principal producto comercializable.

Respecto del efecto sobre el EROI, la situación es muy diferente, son menos las variables sensibilizadas que tienen un impacto sobre él (%Lipid, Prod.CT, %EffE y la interacción de los factores), dado que las restantes tienen una naturaleza netamente económica.

Como se puede apreciar en la Figura 2-14, el %Lipid y %EffE son las variables que tienen un mayor peso sobre el EROI en todos los escenarios evaluados. Resultando que dichos factores son excluyentes entre sí. Cuando uno es determinante en un escenario, el otro tiene una baja participación sobre los cambios del EROI.

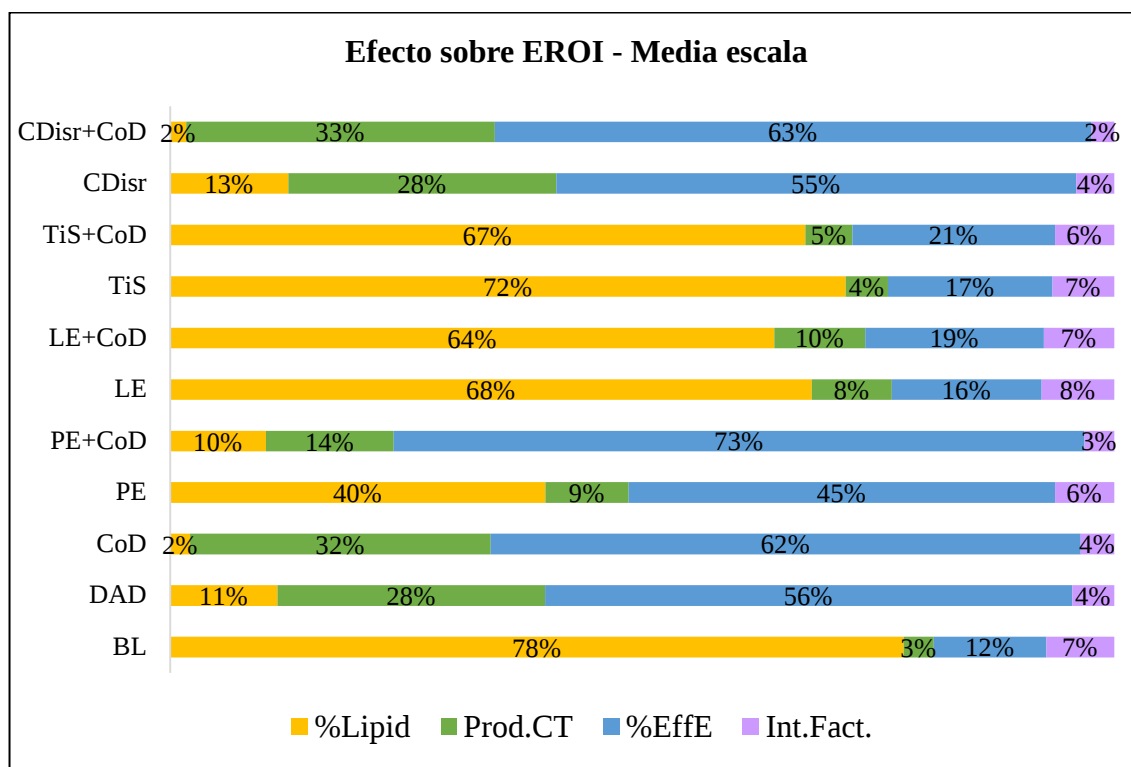


Figura 2-13: Gráfico del peso de los factores sensibilizados sobre el EROI para el cultivo híbrido a mediana escala de *Isochrysis sp.*

2.4. CONCLUSIONES

Las microalgas aún no son una fuente de bioenergía sustentable capaz de competir contra el diésel de origen fósil, incluso abordando su producción bajo el alero de una biorrefinería capaz de valorizar todas las fracciones de la biomasa. Ninguno de los escenarios evaluados en este estudio es capaz de producir más energía que la que consume ($EROI > 1$) y alcanzar al mismo tiempo rentabilidad económica ($NPV > 0$), considerando el empleo de tecnologías tradicionales descritas en el estado del arte y valores moderados para las variables más importantes.

La PE es el escenario más rentable, como era de esperar, sin embargo, es el peor evaluado desde el punto de vista energético. Este resultado genera una alerta ante las motivaciones de la industria, dado que podría ser atractivo económicamente ingresar al mercado farmacéutico y de comercialización de las proteínas, lo que implicaría un alejamiento del foco bioenergético. Sin embargo, el interés por estudiar las microalgas

se origina desde una necesidad por encontrar fuentes de energía de naturaleza sustentable, siendo así necesario que las futuras investigaciones y negocios en base a microalgas, puedan mantener la motivación en la energía como norte.

El análisis de sensibilidad desarrollado en el presente estudio, permite detectar las variables críticas para el proceso completo de producción de bioenergía en base a microalgas y algunos escenarios optimistas para los cuales es posible alcanzar rentabilidad económica. Por proceso completo, se hace referencia a la evaluación desde etapas previas al cultivo hasta la comercialización de los productos finales, lo cual permite comparar las magnitudes en inversión y costos operacionales de las distintas tecnologías empleadas a lo largo del proceso productivo. Otros estudios de evaluación económica adoptan un enfoque metodológico “de puerta a puerta”, lo que limita el análisis de los resultados obtenidos. El modelo aquí propuesto, aborda un análisis “de la cuna a la puerta” (desde la obtención de la materia prima hasta su puesta en el mercado), permitiendo generar una visión más amplia y holística en favor de la industria.

Otras investigaciones sostienen que los costos asociados a las etapas de concentración y extracción de aceite representan el mayor porcentaje dentro de la composición de los costos de producción de la biomasa, convirtiéndose en un factor importante y limitante de la rentabilidad económica. Sin embargo, de los resultados propios de este estudio, se ha podido observar y concluir que tanto la etapa de cultivo como las características propias de la especie escogida son los factores con mayor influencia sobre la rentabilidad económica y aprovechamiento energético.

Los costos en que se incurre durante el cultivo se explican principalmente por el excesivo transporte y manejo de agua inherente al cultivo de microalgas en RWP. Si se piensa que la concentración máxima alcanzable en las piscinas es de 1g/L, se tiene que un 99,9% (en masa) es netamente agua que debe ser bombeada, enriquecida y luego separada de la biomasa. Figurativamente, se puede decir que las operaciones unitarias iniciales del proceso trabajan con agua, no con microalgas. Por esta razón, un cambio en la especie cultivada (mejor productividad biomásica y mayor acumulación de lípidos) tiene un impacto tan significativo sobre el NPV, ya que permite disminuir el volumen de

agua que circula por la planta y número de equipos necesarios para sostener la operación.

La DA es sin lugar a dudas una alternativa atractiva de valorización energética aplicable sobre las distintas fracciones de la biomasa de microalgas que se obtienen de una biorrefinería. En todos los escenarios evaluados mejora el EROI al acoplar CoD a otras alternativas de valorización. Sin embargo, su aplicación directa y exclusiva no es energética-económicamente rentable.

Los resultados de la evaluación económica de multiescenarios de una biorrefinería, a pesar de ser en su mayoría negativos, permitieron acercarnos al umbral de US\$1/L de biodiesel (valor del diésel de origen fósil). Lo anterior fue posible gracias a los contextos o consideraciones optimistas asumidas sobre las variables críticas detectadas. Esto permite mantener las esperanzas sobre la industria bioenergética de microalgas y ayuda a definir los futuros campos de estudio dónde poner los esfuerzos y recursos en Investigación y Desarrollo (I+D).

Abordando en detalle las variables críticas detectadas con mayor impacto sobre el NPV y EROI, se puede concluir que las tecnologías de cultivo necesitan seguir disminuyendo sus costos de inversión (alcanzar mejores economías de escala) y obtener mayores concentraciones máximas y productividades. Al mismo tiempo, sobre el estudio de diversas especies de microalgas, la hiperacumulación de lípidos pareciera ser la clave para las alternativas que consideren comercialización de biodiesel. Sin embargo también es necesario seguir buscando especies que aún no hayan sido descubiertas y que posean características atractivas para la bioenergía, o intentar mejorar la resistencia a variables ambientales durante el cultivo y la productividad biomásica de las especies ya conocidas.

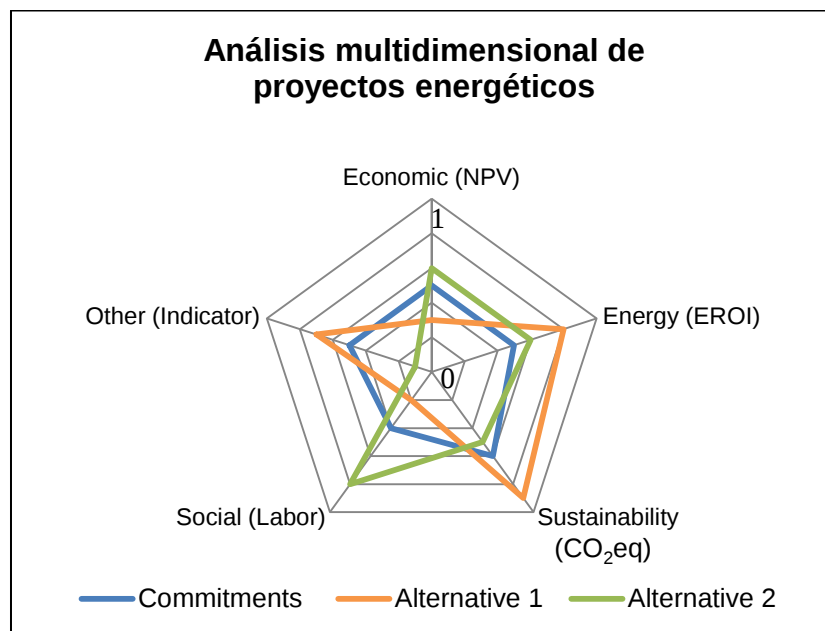


Figura 2-14: Ejemplo teórico de la visualización de los resultados de 2 alternativas o proyectos energéticos, más posibles compromisos país en la materia, luego de un análisis multidimensional estandarizado

A lo largo del presente estudio, se ha abordado la evaluación de proyectos bioenergéticos de microalgas desde la perspectiva económica (NPV) y energética (EROI), sin embargo dicho análisis podría ser más completo y sustentable si se sumaran nuevas dimensiones de evaluación. Por ejemplo, se podría incorporar una evaluación de carácter ambiental cuantificando la huella de carbono en unidad del CO₂ equivalente emitido a la atmósfera.

Es necesaria una metodología que permita evaluar y comparar alternativas energéticas diversas mediante un criterio homogéneo de multi-dimensionalidad estandarizada como el expuesto en la Figura 2-15. Suele ocurrir que estudios donde se desarrollan evaluaciones de proyectos, muestran o potencian solo algunas características favorables de la evaluación, quedando oculto el impacto global del proyecto e imposibilitando su comparación directa con otras alternativas. Sería interesante poder observar y comparar proyectos bajo una metodología que asegure un proceso de evaluación claro, reproducible y sustentable.

3. SELECCIÓN DE SITIOS DE CULTIVO DE MICROALGAS A ESCALA INDUSTRIAL EN CHILE

Cristián P. Bravo Fritz, César A. Sáez-Navarrete, Leandro A. Herrera Zeppelin y
Rosanna Ginocchio Cea

En este capítulo se presenta el borrador de artículo en español enviado a la revista *Algal Research* de Elsevier

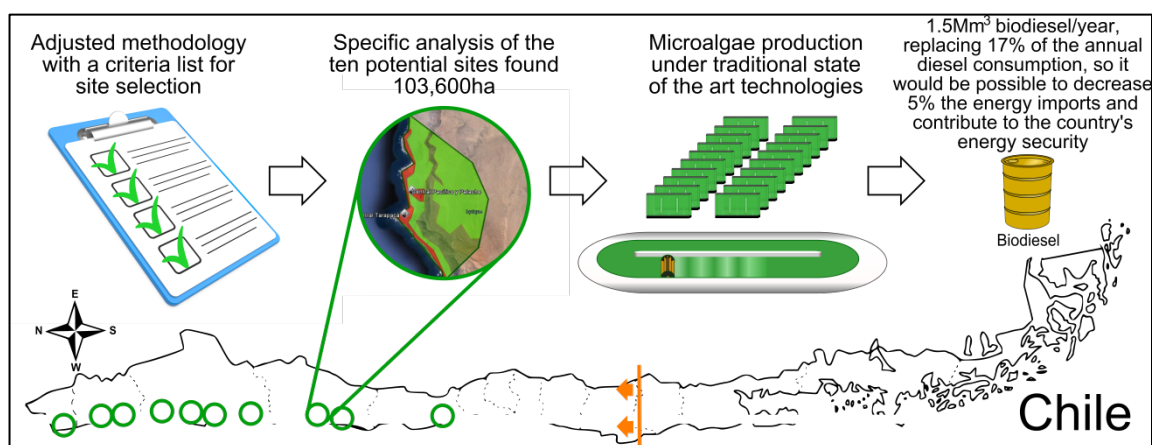


Figura 3-1: Resumen gráfico, presentado a *Algal Research*, sobre selección de sitios de cultivo en Chile

3.1. INTRODUCCIÓN

En términos energéticos, Chile depende del mercado internacional de combustibles fósiles. De las 285,000Tcal consumidas en 2012 (Del Campo, 2012; MinE, 2013), cerca de un 60% es importada y un 66% es de origen fósil, correspondiendo un 31% de ellas a derivados del petróleo. El sector transporte (56%) es el principal consumidor de combustibles fósiles (MinE, 2013). Otro porcentaje de hidrocarburos se destina al sector de generación eléctrica, donde operan centrales térmicas que terminan de definir la demanda nacional. La electricidad es transmitida a través de 6 sistemas independientes conocidos como SING, SIC, SMLL, SMA, SMM e IP. Dada la creciente demanda energética en la última década del sector Industrial-Minero (IyM) (30%) se están

evaluando alternativas de transmisión que podrían tener un fuerte impacto sobre la huella de carbono, los precios y el abastecimiento (MinE, 2013).

Proyecciones del Ministerio de Energía estiman que el consumo para Chile aumentará cerca de un 23% al 2020 (Del Campo, 2012; MinE, 2013). Esta proyección se asemeja bastante a la estimación de la demanda mundial de energía primaria para el mismo período, que prevé un aumento cercano al 20% (IEA, 2012). Dada la magnitud del problema, se debiera producir en el corto plazo un lineamiento concreto en política energética para Chile. Dicha política, debe definir la composición de la matriz, diseñar un nuevo sistema de transmisión eléctrica nacional, garantizar la seguridad del suministro, establecer exigencias de eficiencia energética, definir lineamientos de localización sustentable de nuevas centrales generadoras y fomentar las ERNC, mencionando algunos de los elementos más relevantes.

Frente a escenarios similares, otros países han comenzado a tomar resguardos contra su dependencia del petróleo, y han buscado métodos alternativos para producir combustibles líquidos capaces de sustituir, completa o parcialmente, a los derivados del petróleo. Ejemplos de lo anterior son Alemania, Francia y Argentina, que en la última década han impulsado campañas políticas, subsidios económicos, marcos regulatorios y fomento a la I&D sobre la producción de biocombustibles provenientes de cultivos estacionales, sea por medio de soya, maíz, caña de azúcar o raps (Ahmed et al., 2011). Otro caso es el de Brasil y EEUU, quienes son los mayores productores de biocombustibles a nivel mundial, pero que a diferencia de los ejemplos anteriores, ellos empezaron el incentivo y producción de biocombustibles antes de la última década. En la actualidad la producción mundial de biocombustibles se ha estancado, alcanzando un valor cercano a las 60 Mtep (BP, 2013).

A diferencia de otros países del continente, Chile está recién comenzando a establecer un marco regulatorio general sobre las ERNC, y más particularmente sobre los biocombustibles, siendo hasta el momento su producción, distribución y consumo de carácter voluntario. El país posee un potencial productor limitado de fuentes de biomasa para biocombustibles tradicionales. Teóricamente, Chile podría suplir un 2% de la demanda nacional de gasolina mediante la producción de etanol a partir de maíz y un 5%

de la de diésel gracias al cultivo de raps (Ávalos, 2011; García, Carmona, Lienqueo, & Salazar, 2011). Estos porcentajes se explican a partir del análisis territorial del país, que muestra que solo un 21% de su superficie puede poseer uso agrícola, y de la cual solo un 8% es arable o cultivable (1.266.000 ha, equivalentes al 1,7% del territorio nacional) (FAOSTAT, n.d.).

Otros estudios han expuesto deficientes resultados provenientes de evaluaciones de carácter económico, energético y social, respecto de la producción de biocombustibles tradicionales como el etanol de maíz o el biodiesel de soja (Alexandratos, 2008; Chisti, 2008; Mata et al., 2010; Mueller, Anderson, & Wallington, 2011). Esto ha hecho que la investigación científica destine mayores esfuerzos en encontrar fuentes menos intensivas para la producción de biocombustibles (en términos de uso de suelo, agua, energía y nutrientes), lo que permita sostener una industria más sustentable (Ahmad, Yasin, Derek, & Lim, 2011). Una alternativa a considerar es la biomasa obtenida a partir de microalgas. Esta alternativa posee también otras ventajas relevantes cuando es comparada con los biocombustibles tradicionales, dado que su producción no compite de forma directa con la de alimentos (Driver, Bajhaiya, & Pittman, 2014; Graham-Rowe, 2011) y permite evitar impactos ambientales (i.e. captura de carbono y disminución de emisiones respecto del reemplazo de combustibles fósiles) relacionados al cambio de uso de suelo (Qin, Zhuang, & Chen, 2012).

Las primeras investigaciones relacionadas con el uso de microalgas como fuente de energía se remontan a 1850, instancia en que algunos investigadores logran cultivar a escala de laboratorio diferentes especies aisladas. Posteriormente centraron su interés en mejorar los rendimientos de producción de biomasa para cultivos a escalas mayores, tanto en sistemas abiertos como cerrados. A fines de los 70's, el Departamento de Energía de EEUU (USDOE) creó una división llamada *Aquatic Species Program* (ASP), que estudió la viabilidad de obtener bioenergía a partir de algas. Sin embargo, los bajos precios del petróleo entre 1980-2000 estancaron la I&D de las llamadas “granjas de microalgas”. En 1996 el ASP es descontinuado y resume toda la investigación realizada en el libro de 1998, *A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae* (Andersen, 2005; Sheehan et al., 1998).

Las microalgas son organismos ubicuos, unicelulares, de metabolismo diverso (fotoautotrófico, heterotrófico, mixo-trófico o fotoheterotrófico). Algunas especies pueden cambiar su metabolismo en respuesta a modificaciones de las condiciones ambientales. Por lo general son consideradas fotoautótrofos, con la capacidad de transformar carbono inorgánico, CO_2 , en materia orgánica compleja (p.ej. lípidos, glúcidos y proteínas) (Andersen, 2005; Mata et al., 2010). Estos microorganismos resultan de interés dentro del campo de la bioenergía ya que pueden constituir materia prima sustentable y abundante para la producción de biodiesel, bioetanol, biohidrógeno y biogás, entre otros productos, en el contexto de una biorrefinería (Driver et al., 2014). El biodiesel se obtiene a partir de la transesterificación de los lípidos; el bioetanol, de la fermentación alcohólica de los glúcidos; el biohidrógeno del metabolismo ajustado de microalgas; y el biogás, de la digestión anaerobia de la biomasa completa o de residuos orgánicos que se generen durante el proceso de biorrefinación (Driver et al., 2014). Sin embargo, aún se necesitan mayores avances respecto de la ingeniería celular y de procesos para que los biocombustibles de microalgas encuentren una rentabilidad económica viable (Georgianna & Mayfield, 2012).

A nivel mundial, EEUU, Alemania, China, Australia, Japón y España llevan la vanguardia en I&D de proyectos microalgales bioenergéticos o alimenticios. Por su parte, durante el año 2010, CORFO en Chile adjudicó fondos a tres consorcios empresariales público-privados conocidos como AlgaeFuels S.A., Desert Biofuels S.A. y BAL Biofuels S.A. para el desarrollo tecnologías e investigación en torno a la producción de biodiesel de microalgas -primeros dos- y etanol de macroalgas. Las características geográficas y ambientales únicas de Chile (topografía, extensión y clima) le entregan una potencial ventaja competitiva respecto de la producción de algas con fines bioenergéticos.

Uno de los elementos más relevantes a tener en consideración en la producción de microalgas a escala industrial -tema central del presente estudio- es la localización estratégica de las granjas de cultivo. Estos microorganismos pueden ser cultivados tanto en sistemas abiertos (piscinas o *raceway ponds*) como cerrados (fotobiorreactores o FBR). Sin embargo, dados los altos costos de inversión y operación de los FBRs, se

postula un sistema mixto, donde se persigue el empleo de FBRs como tecnología principal para la producción permanente de inóculo masivo para piscinas de mayor escala, en las que el crecimiento sea rápido para evitar su contaminación (Huntley & Redalje, 2006; Richardson, Johnson, & Outlaw, 2012; Ryan et al., 2009). La utilización de FBRs se presenta como un factor clave en el éxito de esta industria (Greenwell, Laurens, Shields, Lovitt, & Flynn, 2010). De utilizar *raceway ponds (RWP)*, se necesitan extensas superficies de terreno que cumplan diversos requisitos ambientales y de diseño, con el fin de optimizar la producción y operación de la industria. Asumiendo que una granja de microalgas en condiciones estándar permitirá producir $15 \text{ m}^3/(\text{ha} \cdot \text{año})$ de biodiesel, se construyó la Tabla 3-1 (Drapcho et al., 2008).

Tabla 3-1: Extensiones de terreno necesarias para sostener diversas escalas de producción de biodiesel

Escala biodiesel	Escala o tamaño planta	Superficie cubierta por granja de microalgas
$\text{m}^3/\text{año}$		ha
<8.000	Piloto	<530
8.000-40.000	Mediana	530-2.760
>40.000	Industrial	>2.670

La correcta selección del sitio de cultivo puede ayudar a: salvar recursos naturales y agrícolas del país, optimizar la productividad biomásica, reducir los costos de transporte de materiales y el consumo de energía, además de mejorar la percepción y aceptación de la ciudadanía hacia este tipo de proyectos. El primer estudio o reporte identificado de esta índole es el desarrollado por Maxwell et al. (1985), bajo la figura del SERI, actual NREL, para el territorio suroeste de EEUU. Los autores agruparon la información en 3 categorías (clima, agua y suelo), para identificar zonas potenciales de producción, y construyeron mapas donde se superponían todos los datos recolectados (Maxwell, Folger, & Hogg, 1985).

El vacío de estudios entre los años 1985-2010, se alinea al estancamiento de la investigación sobre microalgas en general, según el contexto internacional del petróleo mencionado en la introducción. Sin embargo, desde el 2010 en adelante, se pueden

encontrar varios trabajos que intentan determinar los lugares con mayor potencialidad de producción de microalgas en el mundo (ver Tabla 3-2). En este mismo periodo, el USDOE publica el “*National algal biofuels technology roadmap*”, que incluye un capítulo completo de evaluación de recursos y sitios potenciales (Ferrel & Sarisky-Reed, 2010).

Tabla 3-2: Estudios identificados sobre la selección de sitio de cultivo de microalgas y aprovechamiento de recursos diversos

Año	País	Autores	Inst.	Título
1985	US	E. Maxwell, G. Folger & S. Hogg	SERI	<i>Resource evaluation and site selection for microalgae production systems</i>
2010	US	J. Ferrel & V. Sarisky-Reed	USDOE	<i>National algal biofuels technology roadmap</i>
2010	IN	A. Milbrandt & E. Jarvis	NREL	<i>Resource evaluation and site selection for microalgae production in India</i>
2010	US	T. Lundquist, I. Woertz, N. Quinn & J. Benemann	EBI	<i>A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production</i>
2011	US	J. Quinn, K. Catton, N. Wagner & T. Bradley	CSU	<i>Current large-scale US biofuel potential from microalgae cultivated in photobioreactors</i>
2011	US	M. Wigmosta, A. Coleman, R. Skaggs, M. Huesemann, & L. Lane	-	<i>National microalgae biofuel production potential and resource demand</i>
2011	CA	G. Klise, J. Roach & H. Passell	SANDIA	<i>A study of algal biomass potential in selected canadian regions</i>
2011	US	R. Pate, G. Klise & Ben Wub	SANDIA & USDOE	<i>Resource demand implications for US algae biofuels production scale-up</i>
2012	AU	M. Borowitzka, B. Boruff, N. Moheimani, N. Pauli, Y. Cao & H. Smith	CREST	<i>Identification of the optimum sites for industrial-scale microalgae biofuel production in WA using a GIS model</i>
2014	US	E. Venteris, R. McBride, A. Coleman, R. Skaggs & M. Wigmosta	-	<i>Siting algae cultivation facilities for biofuel production in the United States: Trade-offs between growth rate, site constructability, water availability, and infrastructure</i>

En el 2010, Milbrandt & Jarvis llevan a cabo una evaluación en India para el NREL. Los autores realizan un levantamiento de información pública y privada, culminando con la visualización de diversos sitios potenciales con una herramienta metodológica tipo GIS (*Geographic Information Systems*) (Milbrandt & Jarvis, 2010). De forma similar, en el 2011 y 2012 se ha evaluado el recurso potencial de microalgas en Australia y Canadá, respectivamente (MA Borowitzka, Boruff, & Moheimani, 2012; Klise, Roach, & Passell, 2011). A partir de ese momento, el uso de GIS comienza a ser recurrente, permitiendo a los investigadores modificar, agregar o quitar restricciones, con el fin de hacer más realista la búsqueda de lugares factibles. Algunos elementos en común entre los distintos estudios incluyen terrenos sin uso agrícola y baja pendiente, abundancia de recursos hídricos, elevada radiación solar y temperaturas adecuadas para el cultivo de diversas especies de microalgas (Lundquist, Woertz, Quinn, & Benemann, 2010; Pate, Klise, & Wu, 2011; Quinn, Catton, Wagner, & Bradley, 2011; Venteris, McBride, Coleman, Skaggs, & Wigmosta, 2014).

De esta forma, el presente estudio pretende emplear una metodología para la selección de sitios de cultivo de microalgas en Chile, en base a la información bibliográfica consultada. Se compararan los criterios climáticos, ambientales, geográficos y antropológicos empleados, para determinar un procedimiento que pueda ser aplicable al contexto chileno.

3.2. METODOLOGÍA

Se utilizó una metodología basada en el trabajo de Milbrandt & Jarvis (2010), ajustada al contexto chileno. Esta considera 8 criterios para identificar sitios potenciales para el cultivo de microalgas basados en una configuración híbrida de proceso de cultivo.

Los elementos para la selección de sitios considerados en este estudio fueron:

- a) **Sitios cercanos a fuentes estacionarias emisoras de CO₂, centrales termoeléctricas.** El ANEXO D muestra un mapa con las centrales termoeléctricas de Chile proyectadas y en actual operación, georreferenciadas y clasificadas según tipo de combustible empleado (CNE, 2013; IGM, 2011).

- b) Sitios con una radiación solar diaria (en promedio anual) superior a 4 kWh/(m²·día) o 5.200 MJ/(m²·año).** En base al registro solarimétrico de Chile del año 2008 (CNE, PNUD, & UTFSM, 2008), se construyó un mapa de isolíneas de la radiación global en plano horizontal en MJ/(m²·año) (IGM, 2011).
- c) Sitios que posean más de 6 horas de luz solar diarias, según promedio anual.** Se consultó información de los anuarios climatológicos de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC, 2012), que entregan las horas totales de luz solar al año. El país cumple el requisito de cultivo desde el norte a algún punto entre Concepción y Temuco (aprox. latitud -37,68°, zona centro-sur del país), donde se registran cerca de 2.200 horas de luz solar por año.
- d) Sitios incluidos dentro de una banda aproximada de 10 km desde la costa.** Esta información fue agrupada en el mismo mapa del ANEXO D.
- e) Sitios fuera de reservas nacionales, zonas protegidas y humedales.** El mapa del ANEXO D también incluye una compilación de varios mapas regionales contruidos por el Proyecto GEF SNAP (2012). Mediante el visor de mapas del IDE Chile se localizaron los humedales del país (GEF Project & IDE Chile, n.d.). Solo se muestra la mitad norte del país, dado que con la información de los puntos anteriores ya se puede descartar la zona sur para el cultivo de microalgas.
- f) Sitios cercanos a puertos marítimos o líneas ferroviarias.** El mapa de puertos se construyó con la información entregada por el Servicio Meteorológico de la Armada de Chile sobre la primera, segunda y cuarta zona naval (SMAC, n.d.). A su vez, las rutas ferroviarias fueron identificadas en los mapas terrestres a partir de las guías de turismo nacionales (BCNC, 2009; Chiletur COPEC, 2014).
- g) Sitios con accesibilidad de caminos terrestres.** Al igual que las rutas ferroviarias, las carreteras fueron identificadas utilizando mapas terrestres (Chiletur COPEC, 2014).
- h) Sitios de gran extensión y con una pendiente inferior al 5%.** Una vez identificados los lugares específicos de la combinación de todos los criterios anteriores, se analizaron las pendientes de los terrenos seleccionados mediante la herramienta de altímetro de Google EarthTM.

Con respecto al punto (a), se identificaron los sectores con mayores emisiones de CO₂eq en Chile. Según el informe de línea base 2007 del proyecto MAPS Chile, los 3 sectores más intensivos son: (1) generación eléctrica, (2) transporte-urbanismo, y (3) Industrial y Minería (IyM). Ellos constituyen un 29%, 23% y 18% de las emisiones totales de CO₂ del país, respectivamente (MAPS Chile, 2012). En Chile, las centrales termoeléctricas suelen instalarse en zonas costeras, porque ahí es posible aprovechar el agua de mar como fluido de enfriamiento, así como también por temas logísticos relacionados al abastecimiento de combustibles. En consecuencia, solo serán consideradas las centrales termoeléctricas como fuentes estacionarias de CO₂ en este estudio.

Para mejorar los rendimientos de producción de biomasa, se considera que los FBRs son operados con altas concentraciones de CO₂ empleando aire enriquecido. Esto justifica la instalación de las granjas de cultivo cerca de fuentes fijas de CO₂. Por ejemplo, Chiu et al. (2009) determinaron que la concentración óptima de CO₂ era del 2% v/v. Si las concentraciones fueran menores que 2% o superiores al 5%, las microalgas podrían sufrir un decaimiento en su productividad biomásica (Chiu et al., 2009; Khoo et al., 2011). Como resultado, es necesario determinar la concentración de CO₂ en los gases de salida de la central termoeléctrica, tratarlos para conseguir la concentración deseada y eliminar material particulado o gases específicos que puedan diezmar las facultades propias de los microorganismos. La fijación directa de carbono desde centrales termoeléctricas, suele diseñarse a través de la conexión del sistema de aireación de los FBRs con la salida de los gases de combustión de la central. El diseño propio de estos biorreactores les permite optimizar la transferencia gas-líquido y, en consecuencia, la productividad biomásica. Las tecnologías tradicionales de transferencia gas-líquido no se pueden aplicar sobre las piscinas de cultivo, dado que su profundidad (20-40 cm) no permite una adecuada transferencia de CO₂. Las RWP's suelen emplear paletas giratorias como sistema de agitación tradicional, por lo que para emplearlas como mecanismo de transferencia de CO₂, sería necesario diseñarlas y construirlas en ambientes controlados ricos en carbono (p.ej. invernaderos de CO₂). Alternativamente, se podría complementar/sustituir las paletas por una agitación por bombeo, donde la transferencia gas-líquido del CO₂ ocurra de forma confinada.

Por otra parte, Milbrandt & Jarvis (2010) también proponen considerar sitios aledaños a fuentes de agua subterránea salina ($\text{SDT} > 3.000 \text{ mg/L}$) y a plantas de tratamiento de aguas servidas. La metodología utilizada en este trabajo no incluye estos requisitos, debido al actual contexto del agua en Chile. En los últimos, el país ha experimentado períodos consecutivos de sequías, principalmente en las zonas norte y centro, causando un déficit en los niveles de aguas continentales, perjudicando la agricultura y suministro de agua potable. Además, el marco regulatorio que rige sobre los derechos de aguas, imperante en los últimos 30 años, ha generado inequidades sociales y también ha contribuido al déficit que se ha experimentado (Budds, 2004). El sector minero del cobre es un intensivo consumidor de agua (con proyecciones en alza) en la zona norte, 13 y $2 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua continental y marina en 2014, respectivamente (COCHILCO, 2015). También se debe mencionar, que alrededor del 96% de las aguas servidas en Chile ya son tratadas, empleando tecnologías de lodos activados, lagunas, filtros y emisarios submarinos (SISS, 2013). Por todas estas razones, las fuentes de agua continental propuestas por estos autores para el cultivo de microalgas deben excluirse del análisis desarrollado en este estudio, porque en Chile estas pueden utilizarse como agua potable, irrigación de la agricultura o sustento de ecosistemas naturales, siempre que estas reciban un apropiado tratamiento.

A pesar de la claridad de la información entregada por los análisis de ciclo de vida, un factor que suele ser ignorado por muchos estudios es el costo energético-económico del transporte de suministros y de los productos finales. Dassey et al. (2014) sugieren que la distancia promedio desde las plantas productoras de microalgas al punto de venta final de los productos no sea superior a 150 km, con un gasto energético asociado de $0,1 \text{ kWh/kg}$ transportado (Dassey, Hall, & Theegala, 2014). Si una planta productora de biodiesel de escala industrial produce $40.000 \text{ m}^3/\text{año}$, considerando una densidad del biodiesel de $0,88 \text{ ton/m}^3$ y un valor referencial de la energía de $\text{US\$}0,18/\text{kWh}$, sus gastos operacionales asociados al transporte superarían los $\text{US\$}0,67 \text{ MM/año}$. Por lo que cualquier ahorro generado a través de logística de distribución, empleando medios de transporte más económicos y eficientes, o acortando la distancia con los consumidores finales ($< 150 \text{ km}$), son medidas que podrían reducir los costos de la industria.

En consecuencia, y para el caso específico de Chile, un análisis a tener en consideración y poder realizar en trabajos futuros es la estimación de los costos asociados al transporte de productos derivados de microalgas por medio de ductos superficiales o sumergidos. Las características geográficas del país -relieve y extensión- permiten suponer una potencial ventaja del bombeo por oleoductos sobre otros métodos de transporte. Los oleoductos podrían seguir la costa de Chile (cota cero) para bombear materia prima (p.ej. lípidos) hacia infraestructura existente en la zona Centro especializada en refinamiento de combustibles (p.ej. refinería de ENAP en Concón). Un elemento más aplicable al contexto chileno de selección de sitios de cultivo que la localización de puertos marítimos y rutas ferroviarias, podría ser la generación de indicadores sobre la distancia o pérdidas de carga máximas permisibles, respecto del bombeo desde la costa hacia puntos de procesamiento y producción de biocombustibles, todo de acuerdo a bases técnico-económicas.

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Un mapa que unifica los elementos de selección de sitios de cultivo fue construido mediante una superposición de diferentes mapas de Chile, como se puede apreciar en el ANEXO D. En él, 10 sitios fueron identificados como posibles zonas para el cultivo de microalgas a escala industrial en Chile (Tabla 3-3).

Tabla 3-3: Superficies analizadas con potencial para el cultivo de microalgas a alta escala en Chile, los resultados se representan gráficamente en la Figura 3-2

Lugar	Total identificado bajo los 8 criterios	Zona habitada o utilizada	Zona no construible por pendiente	Zona potencial
	Superficie (ha)			
1 Arica	18.116	5.307	7.112	5.697
2 Iquique	15.618	2.881	8.498	4.239
3 Patache	17.318	1.440	5.571	10.307
4 Tocopilla	30.492	627	17.088	12.777
5 Mejillones	80.447	2.129	32.425	45.893
6 Antofagasta	17.975	3.735	12.067	2.173
7 Taltal	17.448	31	15.435	1.982
Bahía				
8 Chascos	12.661	0	1.913	10.748
9 Huasco	24.054	2.094	14.978	6.982
10 Los Vilos	24.757	1.189	20.727	2.841
Total	258.886	19.433	135.814	103.639

Utilizando Google EarthTM, se analizaron los 10 posibles sitios de cultivo (ver Figura 3-2), todos dentro de un radio de 10 km desde la central termoeléctrica costera y descartando zonas pobladas, industriales o de uso agrícola. Adicionalmente, se sumó el criterio de selección (h) de la metodología, pendiente del terreno menor al 5%, con lo que se descartaron las zonas con pendientes mayores.

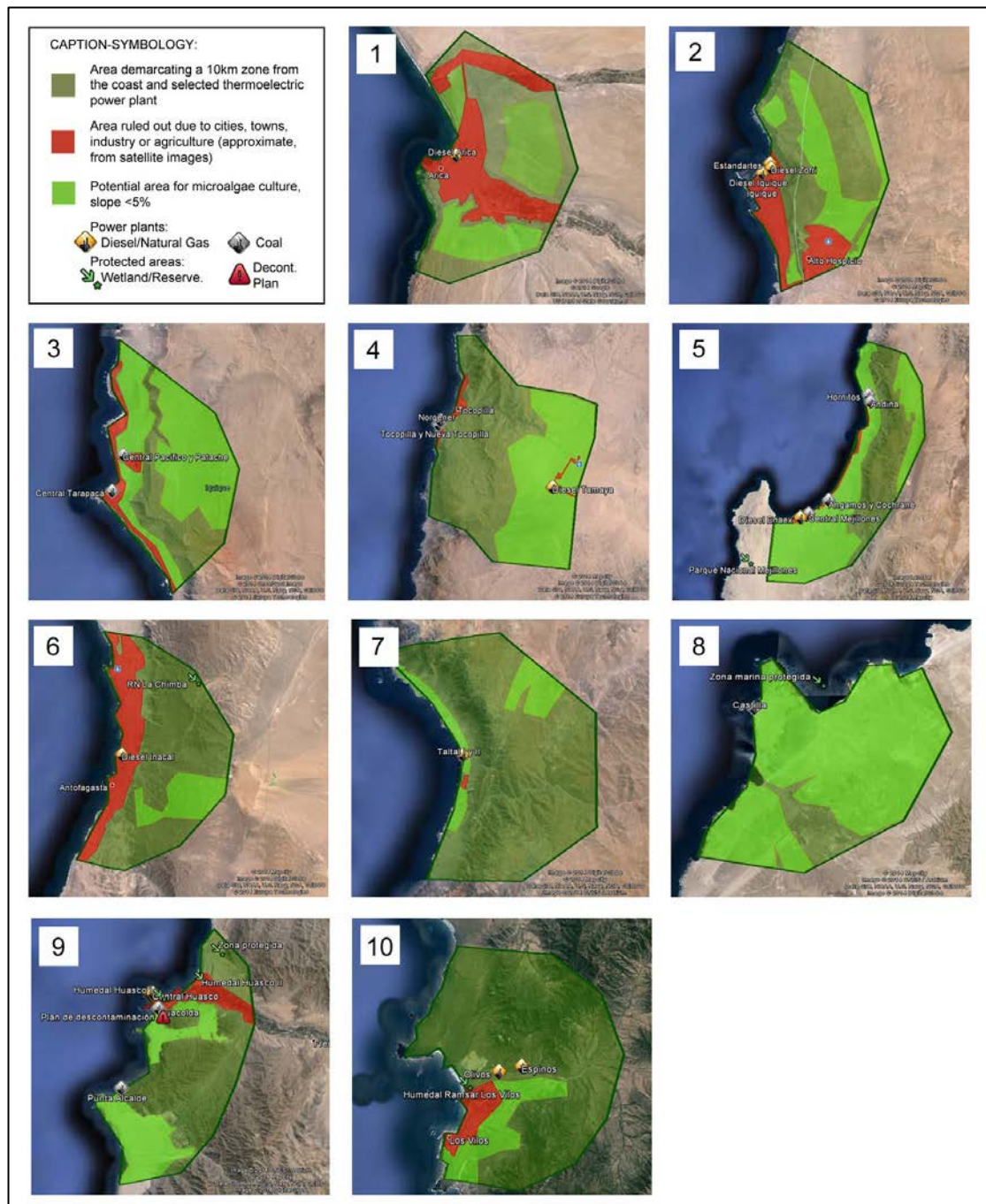


Figura 3-2: Imágenes de los 10 sitios identificados en Chile con potencial para el cultivo de microalgas a escala industrial y que fueron sometidos a un análisis subsecuente sobre la pendiente (elevación) del terreno

De todos los lugares encontrados, solo el de Bahía Chascos no se presenta como una alternativa en el corto o mediano plazo para construir granjas de cultivo de microalgas. Esto se debe a que en aquella bahía está pensado un proyecto de central termoeléctrica, conocido como Castilla. El proyecto Castilla tuvo varios problemas y críticas desde un punto de vista social, legal y ambiental, lo que llevó a suspender su construcción en 2012. Por esta razón, el cultivo de microalgas en las 10.700ha detectadas en la Bahía Chascos, mediante los criterios de selección de sitios, queda sujeto al futuro que corra Castilla. El resto de los sitios presenta centrales termoeléctricas de distinta capacidad instalada y tipo de combustible en operación, por lo que su potencialidad es segura.

Se revisaron los mapas carreteros en todos los sitios con potencialidad para cultivos de microalgas identificados, comprobando que en todos los casos existen accesos para camiones, buses y automóviles. En consecuencia, este punto no generaría restricciones para el contexto chileno.

A partir de una proyección lineal, las 103.600ha potenciales identificadas (ver Tabla 3-3), podrían llegar a producir cerca de $1.554.600\text{m}^3/\text{año}$ de biodiesel. Asumiendo una productividad conservadora de $15\text{m}^3/(\text{ha}\cdot\text{año})$ de una planta con cultivo mixto de microalgas (FBRs y RWP) (Bravo & Sáez, 2012), sería posible reemplazar el 17,14% del consumo anual de diésel de Chile y disminuir la importación de energía en un 5% (MinE, 2013).

En términos territoriales, la totalidad de los sitios potenciales representa un 0,1% del territorio nacional, principalmente compuesto por desierto -sin uso agrícola o zonas naturalmente degradadas- localizadas en la zona norte del país. Indirectamente, se estaría transformando terreno sin condiciones agrícolas en “terreno cultivable o arable”. De considerarse de esta forma, Chile estaría aumentando su territorio cultivable en un 7,9%. Es importante destacar que en este análisis solo evalúa zonas costeras, donde el uso y consumo de agua está estrictamente ligado al agua de mar enriquecida (medio de cultivo para especies marinas). Los volúmenes de recurso hídrico que se debieran utilizar para reemplazar el 17,14% de consumo de diésel a nivel nacional, representarían aproximadamente $1\text{Gm}^3/\text{año}$ de agua (M. A. Borowitzka & Moheimani, 2010; MA Borowitzka et al., 2012), considerando que el agua de cultivo puede recircularse, que las

microalgas poseen un 25% de lípidos y que alcanzan una concentración máxima en las piscinas de 1g/L. Se consideran pérdidas de este recurso la evaporación durante el cultivo (2.000 mm/año) y la humedad remanente de la biomasa luego de la cosecha (90% en masa). Dado que los 10 sitios potenciales pertenecen al norte del país, el agua será un recurso escaso en ellos. Preferir especies de microalgas de agua dulce por sobre las marinas, podría tener como consecuencia un déficit en el abastecimiento de agua sobre sectores urbanos, agrícolas y naturales.

Casi todos los posibles sitios de cultivo están localizados en zonas de desierto costero, salvo Los Vilos, que puede considerarse un clima semiárido con lluvias invernales. Además, en dicha localidad hay presencia de actividad minera que ocupa terreno costero para el procesamiento del cobre proveniente de la planta de Minera Los Pelambres a través de un ducto de 120km. Huasco, por su parte, es conocido por sus abundantes cultivos de olivos. Por lo tanto, ambas locaciones -de ser destinadas para el cultivo de microalgas de alta escala- deben analizarse más detalladamente con el fin de no competir con otras industrias o sectores productivos.

El análisis aquí realizado considera la utilización de terrenos dentro de un radio de 10 km desde la costa, según metodología propuesta por Milbrandt & Jarvis (2010). Sin embargo, se sabe que es posible bombear agua de mar en distancias superiores hacia territorio adentro. De hecho, tanto la actividad minera como la investigación realizada por Borowitzka et al. (2012), proponen metodologías de operación más optimistas que permiten alcanzar mayores distancias de bombeo (sobre 150km) (Antofagasta Minerals, n.d.; MA Borowitzka et al., 2012). Para poder ampliar el criterio de búsqueda de sitios de cultivo en Chile, es necesaria una evaluación energético-económica específica donde se sensibilice la distancia permisible de bombeo. Otra opción que podría ayudar al bombeo de agua de mar, es la evaluación de modelos que acoplen centrales hidroeléctricas de bombeo al cultivo de microalgas en zonas más alejadas de la costa, aprovechando la intensa radiación solar del desierto de Atacama en el día y generando a su vez energía eléctrica en la noche.

Con respecto al balance de carbono y a cuánto CO₂ se podría desplazar con el uso de biodiesel de microalgas, hay que analizar la composición de su biomasa para saber

cuánto carbono potencial pueden llegar a fijar. Asumiendo una composición y fórmula estequiométrica (CHONS) promedio de lípidos, proteínas y glúcidos de 25%, 50% y 25%, con fórmulas químicas representativas $C_{50}H_{87}O_6$, $C_{184}H_{350}O_{86}N_{33}S$ y $C_6H_{11}O_5$, respectivamente (Bohutskyi & Bouwer, 2013; Sialve et al., 2009). Así, la fórmula estequiométrica promedio de la biomasa de microalgas sería $C_{212}H_{399}O_{91}N_{33}S$, con un peso molecular (PM) de 4896g/mol. Dado que los nutrientes que son adicionados al agua de mar para formar el medio de cultivo suelen no considerar productos carbonatados, todo el carbono presente en la fórmula estequiométrica proviene de la fijación de CO_2 . De esta manera, por cada tonelada de microalgas producidas, se fijan cerca 520kg de carbono inorgánico (2,4t CO_2 e). Sin embargo, como las microalgas se cultivan para producir biodiesel y no para ser secuestradas, su huella de carbono definitiva debe obtenerse del análisis de ciclo de vida de su producto y co-productos finales. Existen diversos estudios sobre la huella de carbono de la producción y procesamiento de microalgas. Algunos autores le atribuyen una reducción de emisión efectiva -en términos de kg de CO_2 /MJ de biodiesel-. Otros afirman que es un proceso con emisiones propias, principalmente debido al consumo energético de las etapas de cultivo, desaguado, ruptura celular, transesterificación y valorización energética de los co-productos (Schlatter, 2014). El resultado del indicador suele depender de los supuestos considerados (Khoo et al., 2011).

La incertidumbre sobre los resultados aquí presentados depende de la precisión de la información disponible y de la profundidad del análisis realizado. En este estudio fueron localizados los mejores 10 sitios para cultivar microalgas en Chile, sin embargo es necesario profundizar en las características de ellos, especialmente creando mapas que muestren los terrenos con pendiente menor al 5% y desarrollando estudios de suelo para asegurar la correcta construcción de las piscinas. Factores adicionales a tener en mente incluyen los derechos de propiedad y el valor de los terrenos potenciales. El caso ideal considera que dichas zonas pertenecen a bienes nacionales, pudiendo ser concesionados por períodos acordes a la explotación sustentable de este recurso. También, la creación de herramientas computacionales propias en base a GIS para superponer mapas y

requisitos relevantes para el cultivo de microalgas, puede ayudar a identificar zonas potenciales con mayor exactitud (Venteris et al., 2014).

3.4. CONCLUSIONES

Chile se caracteriza por ser un país rico en recursos naturales, gracias a su diversidad geográfica y climática. Los 6.435km de costa que posee, han posibilitado el desarrollo de numerosas actividades humanas a lo largo de su historia. El mar chileno aún alberga potencialidades desconocidas, esto mientras su explotación se realice de forma sustentable y responsable. A su vez, el territorio nacional se caracteriza por su actividad minera y energética, principalmente en el norte, y por el desarrollo de una industria silvoagropecuaria diversa y abundante en el sur del país.

La industria bioenergética en base a microalgas representa una oportunidad de entrelazar varias de las potencialidades de Chile. Esta puede desarrollarse en terreno no cultivable, con agua de mar y aprovechando variables ambientales que pueden generar un factor diferenciador respecto de otros países. Según lo expuesto en este estudio, casi la mayor parte del norte costero de Chile cumple los requisitos ambientales y de operación que posibilitan el desarrollo de esta industria.

Fueron 10 los posibles sitios de cultivo seleccionados, marcados principalmente por la presencia de centrales termoeléctricas y extensiones de terreno que permiten construir las piscinas de cultivo. La Bahía de Mejillones se presenta como la principal localidad a nivel nacional para instalar granjas productoras de microalgas, esto en términos de su extensión de terreno con potencialidad de cultivo. Al igual que otras locaciones del norte costero de Chile, Mejillones presenta numerosos problemas ambientales debido a la intensa actividad industrial que ahí se desarrolla. El cultivo de microalgas podría ayudar a combatir los impactos ambientales de otras industrias, sugiriendo el tratamiento y aprovechamiento de emisiones directas, a aquellas que decidieran proporcionar un suministro de CO₂ para la formación de biomasa en FBRs.

Alternativamente, el aprovechamiento de aguas continentales sin uso agrícola, humano y ambiental protegido, puede ser otra forma de ampliar el criterio de búsqueda de lugares potenciales. Aguas continentales con salinidad elevada, contaminadas de forma natural o

antropogénica con metales pesados, con metaloides o derivadas de la actividad minera y agrícola, podrían ser alternativas viables si se evalúan de forma sustentable. El cultivo de microalgas con aguas continentales debe estar acompañado de estudios de impacto ambiental y trabajo sistemático con las comunidades locales para que puedan entender y participar de su desarrollo. Sin embargo, la consideración de aguas continentales es un capítulo separado de estudio, el cual involucra un análisis metodológico y discusión diferente a la propuesta en esta investigación.

Trabajos futuros debieran estudiar en detalle los posibles sitios de cultivo detectados, levantando nueva información y actualizando la ya existente. En esta línea, ayudaría ordenar los sitios con potencialidad según la productividad biomásica alcanzable en cada uno de ellos. Es necesario poder determinar la potencialidad efectiva del territorio chileno para generar una estrategia holística en torno al desarrollo de una industria bioenergética, donde las microalgas siguen siendo una prometedora fuente de biomasa para el futuro.

Nomenclatura del Capítulo :

ERNC = Energías renovables no convencionales

SING = Sistema interconectado del norte grande

SIC = Sistema interconectado central

SMLL = Sistemas medianos de los Lagos

SMA = Sistemas medianos de Aysén

SMM = Sistemas medianos de Magallanes

IP = Isla de Pascua

IyM = Industrial y minero

Mtep = Millones de toneladas equivalentes de petróleo

GEI = Gases de efecto invernadero

GIS = Sistemas de Información Geográfico

FBR = Fotobiorreactor

RWP = *Raceway pond*

4. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES FINALES, JUNTO A RECOMENDACIONES Y APORTES

4.1. PRINCIPALES DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Las microalgas son una prometedora fuente de bioenergía, con la capacidad de ser producidas en terrenos que no compiten con otras actividades humanas (desierto), utilizando agua de mar y consumiendo CO₂ como principal fuente de carbono para procesos fotosintéticos.

A pesar de que la investigación científica sobre ellas se ha incrementado marcadamente en la última década, el origen de su estudio se remonta a mediados del siglo XIX. El interés de la bioenergía sobre las microalgas, se asocia a la necesidad de la humanidad por disminuir su dependencia hacia los combustibles derivados del petróleo. Por lo que los períodos de investigación más intensiva, coinciden con contextos internacionales donde el valor del crudo es elevado o incierto.

Desafortunadamente, la rentabilidad económica asociada a su industria bioenergética aún no es atractiva para inversionistas privados que la puedan potenciar y masificar. Su desarrollo suele estar ligado a proyectos de investigación en Universidades, proyectos cofinanciados por fondos públicos, producción de proteínas para alimentación animal u obtención de metabolitos de alto valor comercial que son interesantes para la industria farmacéutica. En Chile, los Consorcios público-privados del 2010 (CORFO), han investigado diversas formas de llevar el cultivo de especies nacionales desde el laboratorio hacia una escala pre-industrial sin resultados favorables reportados hasta la fecha para la bioenergía.

Según los resultados de la presente tesis, es posible mejorar la rentabilidad económica de la industria de microalgas, realizando cultivos a escala industrial en Chile y seleccionando escenarios o contextos específicos para una biorrefinería.

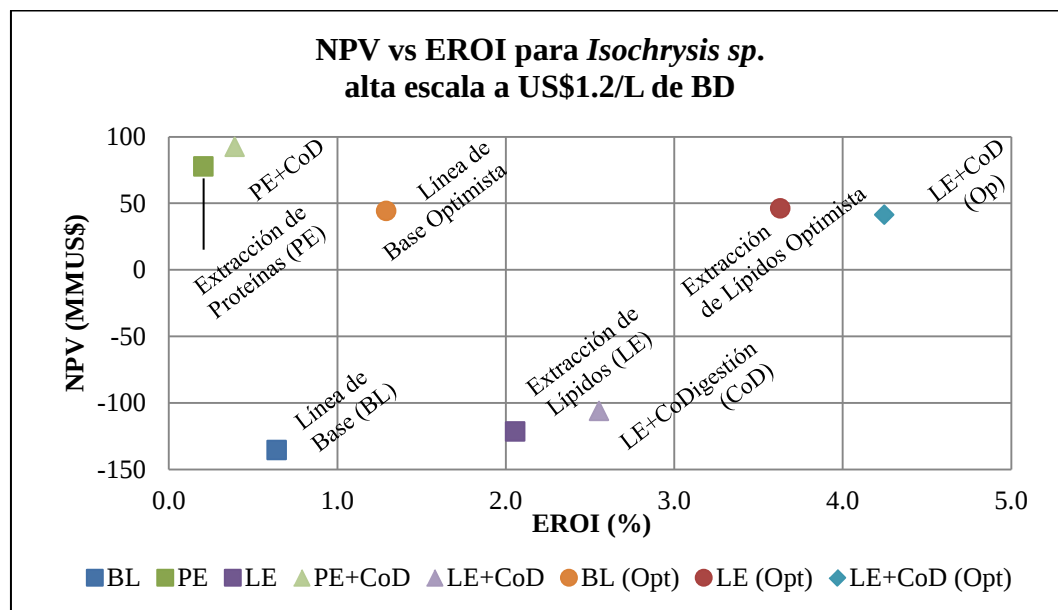


Figura 4-1: NPV vs EROI de los mejores escenarios respecto de la línea de base para *Isochrysis sp.* de alta escala y considerando venta del biodiesel a US\$1.2/L

Por ejemplo, de la Figura 4-1 se puede ver que la BL es superada, en rentabilidad económica, por los escenarios PE (157%), LE (10%), PE+CoD (168%) y LE+CoD (22%). Del contexto optimista definido en el Capítulo 2, se tiene que BL (Opt), LE (Opt) y LE+CoD (Opt) alcanzan rentabilidad económica vendiendo el BD a US\$1.2/L.

Según estos resultados, los beneficios de considerar los mejores escenarios para biorrefinerías, están más vinculados a una ganancia energética que económica. Si bien es cierto que la rentabilidad económica mejora, el incremento en el EROI de los distintos escenarios respecto de la BL es mucho más significativo. Siendo posible triplicar su valor para algunos escenarios que se asocian a la LE.

El contexto optimista, pareciera ser más atractivo -en términos económicos- que los escenarios evaluados, dado que permite alcanzar valores positivos y mejoras en rentabilidad de un 132% en promedio. Las variables sensibilizadas que definen este contexto (%Lipid, Prod.CT, \$CT, %EffE y \$EE), se presentan como alternativas interesantes de estudio y desarrollo de futuras investigaciones.

A pesar de que el modelo de evaluación propuesto en esta tesis es muy flexible y abarca distintos escenarios, aún existen muchas combinaciones y alternativas de valorización que pueden ser evaluadas y comparadas con los resultados aquí obtenidos.

Experiencias desarrolladas por el grupo de investigación del Laboratorio de Energías Renovables y Residuos del Departamento de Ingeniería Química y Bioprocesos de la Pontificia Universidad Católica de Chile, han detectado la capacidad específica de algunas microalgas por desplazarse hacia la luz (fototropismo) o generar biofilms para favorecer su crecimiento. Estas características podrían tener impactos directos sobre las etapas de cultivo y cosecha, de ser aplicadas en forma eficiente a procesos de escala industrial.

Según lo expuesto en el Primer Seminario Internacional de Microalgas desarrollado en las instalaciones de Fundación Chile en 2012, existen investigadores que están tratando, mediante modificaciones genéticas, que algunas microalgas secreten los lípidos al medio de cultivo, sin perder sus condiciones biológicas y fisiológicas. Esta particular característica, podría evitar la cosecha continua de los cultivos y permitiría la separación de fases entre agua y aceites para recuperar los lípidos secretados. Los expositores hicieron mención a la siguiente analogía: “Si el objetivo es la leche, no se mata a la vaca, se ordeña. Lo mismo se puede hacer con las microalgas”.

Características tan específicas como las antes mencionadas, escapan del alcance de la presente tesis. La evaluación, tanto económica como territorial del recurso de microalgas para el contexto chileno, tuvo que considerar procesos bien definidos por el estado del arte para poder modelar su aplicación a escala industrial. Tecnologías tan al borde de la ciencia, a pesar de poseer mucha potencialidad, al ser evaluadas económicamente entregan resultados poco confiables y sujetos a mayores márgenes de error.

En el trabajo realizado se reconocen los siguientes aportes:

- a) Primeras evaluaciones técnico-económicas para escalas industriales de los escenarios TiS, EP, DAD y CoD. Por lo general los estudios en microalgas evalúan la producción de BD solamente, descartando otros destinos de la biomasa.
- b) Análisis de pre-factibilidad para la TiS seca vs húmeda. Esto es algo original y que podría dar pie a futuros artículos. Se prefirió la TiS seca por sobre la húmeda,

debido a que los costos operacionales de esta última eran excesivamente elevados. Si ya la TiS seca no es competitiva frente a otros escenarios evaluados, la húmeda pareciera ser poco realista en su consideración.

- c) Escalamiento del proceso global. Es interesante poder analizar el efecto de economías de escala, comúnmente aplicado en la ingeniería química y de procesos, sobre la industria de microalgas. El modelo permite vincular la escala deseada a evaluar, con el número y tamaño de equipos necesarios, volúmenes de operación, superficie de terreno necesaria, razón entre FBRs y RWP para sostener cultivo híbrido, etc.
- d) Flexibilidad sobre el análisis de sensibilidad. El modelo propuesto permite agregar fácil y amigablemente variables sometidas a sensibilización. Esta característica lo destaca por sobre otras evaluaciones que son más rígidas en torno a la especie de microalga evaluada, precios asumidos o configuración de procesos definida.
- e) Análisis del peso de los factores. El análisis estadístico realizado (modelo de regresión lineal estandarizado) también es una componente original del trabajo presentado. Otros estudios no toman este camino para realizar el análisis de sensibilidad, sino que someten su variable de respuesta (p.ej. NPV) a cambios porcentuales predefinidos de variables arbitrarias y grafican linealmente su respuesta particular (como se puede ver en la Figura 4-2). Debido a que el modelo tiene tantas dimensiones de análisis (escala, microalga, tecnología de cultivo, escenario evaluado y variables sensibilizadas), se tuvo que tomar una metodología diferente a la tradicional, resultando en las gráficas del ANEXO B.

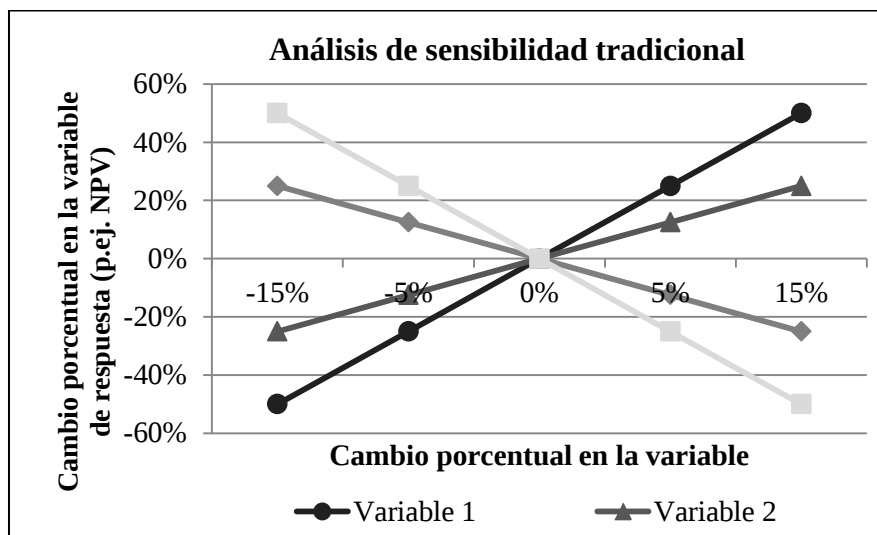


Figura 4-2: Gráfica asociada a un análisis de sensibilidad tradicional

- f) NPV vs EROI. La discusión en torno a la viabilidad de un escenario tanto en términos económicos como energéticos, abre las puertas a evaluaciones más sustentables de recursos energéticos. Como lo comentado al final del Capítulo 2, donde se menciona que cada alternativa se podría evaluar en múltiples dimensiones (económica, energética, ambiental y social).
- g) Se destaca la originalidad y novedad de la identificación de sitios potenciales de cultivo de microalgas en Chile.
- h) Se entrega un dimensionamiento aproximado de este recurso para el país, según supuestos conservadores.

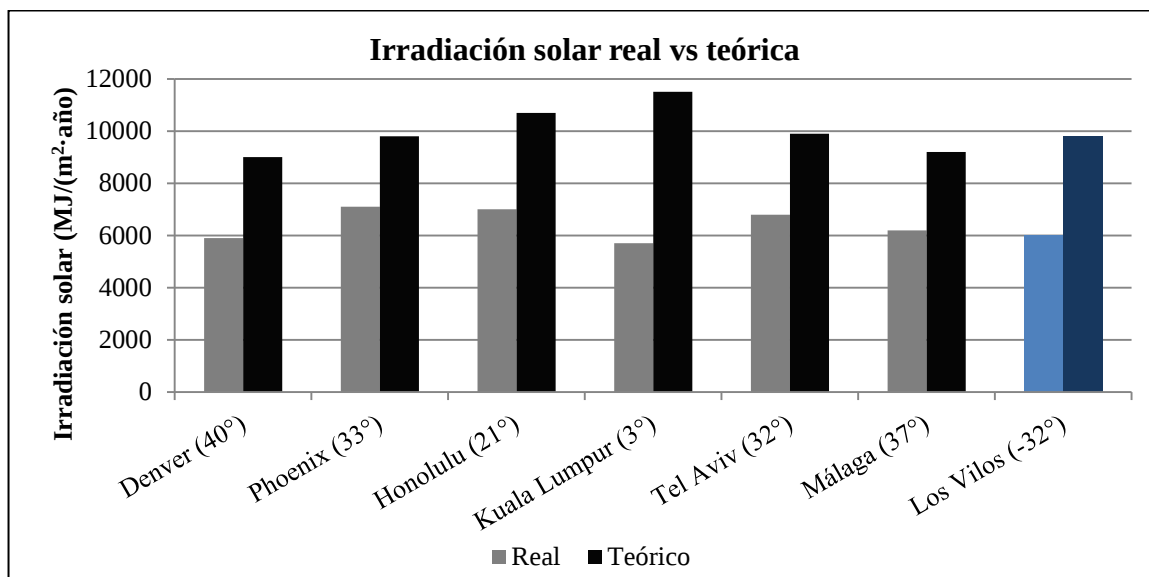


Figura 4-3: Irradiación solar anual real vs teórica para diferentes ciudades y comparación con el caso real de Los Vilos

Fuente: Elaboración propia en base a (Weyer, Bush, Darzins, & Willson, 2010)

El peor sitio detectado en Chile, desde el punto de la irradiación solar anual promedio, es Los Vilos, el más al Sur de los 10 identificados. En Los Vilos se reportan radiaciones horizontales promedio de 6,000MJ/(m²·año) o 4.6kWh/(m²·día) (CNE et al., 2008). Este valor supera a ciudades como Denver, Kuala Lumpur y es cercano al de Málaga (ver Figura 4-3). Lugares que reportan productividades de BD de 44, 41 y 46m³aceite/(ha·año), respectivamente (Weyer et al., 2010). De esta forma, los 15m³BD/(ha·año) asumidos para todo el territorio nacional parecen ser bastante conservadores o pesimistas (75% más bajo). Este valor sería el piso mínimo de potencialidad del recurso en Chile, permitiendo que cualquier cambio de consideraciones pudiera implicar un aumento en la generación de BD.

- i) Visibilidad de Chile hacia el mundo. La evaluación de este recurso a nivel nacional y la mención de los Consorcios en el artículo enviado a la revista internacional, deja en evidencia el interés por desarrollar esta potencial industria en Chile. Esto podría llamar la atención de potenciales co-investigadores o inversionistas que valoren las condiciones naturales diferenciadoras del país.

4.2. PERSPECTIVAS PARA TRABAJOS FUTUROS

Los resultados entregados respecto de la evaluación económica de multiescenarios para una biorrefinerías y la localización de sitios con potencialidad para el cultivo de microalgas en Chile son interesantes y generan un aporte científico concreto, sin embargo para que su impacto y aplicabilidad sea mayor, requieren ser acompañados de investigaciones adicionales.

De las conclusiones de los artículos expuestos en los Capítulos 2 y 3, se puede pensar en algunas investigaciones futuras como las propuestas a continuación:

- a) Encontrar la microalga nacional y condiciones de cultivo específicas que permitan acercarse al 40% de lípidos en la biomasa, según el contexto optimista definido en el Capítulo 2 para *Isochrysis sp.* (porcentaje de lípidos de la microalga aumenta en un 70%).
- b) Sumar indicadores de sustentabilidad a la evaluación de biorrefinerías de microalgas mediante análisis de ciclo de vida (emisiones de CO₂eq asociadas, huella de agua, análisis sobre el impacto social del proyecto, etc.).
- c) Comparar, bajo los indicadores de sustentabilidad mencionados en el punto (b), la producción de microalgas con las ERNCs, biocombustibles tradicionales, hidrógeno (H₂) u otras fuentes de energía convencionales.
- d) Mejorar la información disponible respecto de la pendiente del territorio chileno, construir mapas y tablas de información accesibles vía web pública.
- e) Realizar un ranking según productividad biomásica, huella de agua y emisiones de CO₂eq de los sitios con potencialidad de cultivo detectados. Para esto será necesario levantar mayor información climática, geográfica y de operación particular para cada localidad.
- f) Crear una nueva metodología de selección de sitios de cultivo específica para el contexto chileno o internacional si es pertinente.
- g) Desarrollar un análisis técnico-económico asociado al bombeo costero de aceites hacia refinerías donde se produzcan los biocombustibles. Determinar la distancia máxima permisible entre la planta de cultivo y la refinería.

Dentro del campo de la bioenergía, las microalgas necesitan un lugar seguro para desarrollar su investigación actual y futura. Comparadas con las plantas terrestres presentan un metabolismo mucho más simple y eficiente, lo que les entrega un atractivo adicional intrínseco. Algunas de ellas, conocidas como cianobacterias, se encuentran dentro de los organismos más antiguos que habitan el planeta y se les entrega el título de creadoras de la fotosíntesis. Estudiar su cultivo controlado y posterior procesamiento para obtener metabolitos convertibles en biocombustibles, es equivalente a mirar el origen del petróleo fósil, que tuvo que esperar millones de años, bajo condiciones específicas, para convertirse en el motor energético de la sociedad contemporánea.

BIBLIOGRAFIA

- Ahmad, a. L., Yasin, N. H. M., Derek, C. J. C., & Lim, J. K. (2011). Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 584–593. doi:10.1016/j.rser.2010.09.018
- Ahmed, S., Jaber, A., Konukiewitz, M., Dixon, R., Eckhart, M., Hales, D., & Thompson, G. (2011). *Renewables 2011 Global Status Report*. Paris, France. Retrieved from <http://www.ren21.net/ren21activities/globalstatusreport.aspx>
- Akbulut, A. (2012). Techno-economic analysis of electricity and heat generation from farm-scale biogas plant: ??i??ekda??i{dotless} case study. *Energy*, 44(1), 381–390. doi:10.1016/j.energy.2012.06.017
- Alexandratos, N. (2008). Food Price Surges: Possible Causes , Past Experience , and Longer Term Relevance, 98(December), 663–697.
- Alzate, M. E., Muñoz, R., Rogalla, F., Fdz-Polanco, F., & Pérez-Elvira, S. I. (2012). Biochemical methane potential of microalgae: influence of substrate to inoculum ratio, biomass concentration and pretreatment. *Bioresource Technology*, 123, 488–94. doi:10.1016/j.biortech.2012.06.113
- Andersen, R. (2005). *Algal culturing techniques*. (Phycological Society of America, Ed.). San Diego, USA: Elsevier Academic Press. Retrieved from <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=9NADUHyFZaEC&oi=fnd&pg=PR7&dq=Algal+Culturing+Techniques&ots=BvCr1fKOTi&sig=2GyivBrX6QdpcD6t0fOFwi68Hdw>
- Antofagasta Minerals. (n.d.). Uso de Agua de Mar en Procesos [Use of seawater in processes]. Retrieved March 3, 2015, from <http://www.aminerals.cl/mineria-sustentabilidad/casos-sustentables/uso-de-agua-de-mar-en-procesos-esperanza/>
- Asinari Di San Marzano, C.-M., Legros, A., Naveau, H. P., & Nyns, E.-J. (1982). Biomethanation of the Marine Algae *Tetraselmis*†. *International Journal of Solar Energy*. doi:10.1080/01425918208909891
- Ávalos, V. (2011). Biocombustibles en Chile [Biofuels in Chile]. Santiago, Chile. Retrieved from <http://www.cec.uchile.cl/~biocombustibles/VivianaAvalosBiocombustiblesliquidosUCHile15nov2010.pdf>
- Ballantyne, a. P., Alden, C. B., Miller, J. B., Tans, P. P., & White, J. W. C. (2012). Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years. *Nature*, 488(7409), 70–72. doi:10.1038/nature11299

- Barbarino, E., & Lourenço, S. O. (2005). An evaluation of methods for extraction and quantification of protein from marine macro- and microalgae. *Journal of Applied Phycology*, 17, 447–460. doi:10.1007/s10811-005-1641-4
- Barker, T. (IPCC). (2007). Climate Change 2007 : An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Change*, 446(November), 12–17. doi:10.1256/004316502320517344
- Bauen, A., Berndes, G., Junginger, M., Vuille, F., & Londo, M. (2009). Bioenergy - A Sustainable and Reliable Energy Source. *Structure*, 1–108. Retrieved from http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0912_IEA_Bioenergy_-_MAIN_REPORT_-_Bioenergy_-_a_sustainable_and_reliable_energy_source._A_review_of_status_and_prospects.pdf
- BCNC. (2009). Biblioteca del Congreso Nacional de Chile - Mapas vectoriales [Library of National Congress of Chile - Vectorial maps]. Retrieved from http://siit2.bcn.cl/mapas_vectoriales/index_html/
- Benemann, J. R., & Oswald, W. J. (1996). Systems and Economic Analysis of Microalgae Ponds for Conversion of CO₂ to Biomass. *Final Report to the Department of Energy, Pittsburgh Energy Technology Center*, DOE/PC/93204–T5. doi:10.2172/493389
- Biotecsur. (n.d.). Biodigestores para empresas agrícolas y otras industrias. Retrieved February 20, 2015, from <http://biotecsur.cl/>
- Bohutskyi, P., Betenbaugh, M. J., & Bouwer, E. J. (2014). The effects of alternative pretreatment strategies on anaerobic digestion and methane production from different algal strains. *Bioresource Technology*, 155, 366–372. doi:10.1016/j.biortech.2013.12.095
- Bohutskyi, P., & Bouwer, E. (2013). *Advanced Biofuels and Bioproducts. Chapter 36. Biogas Production from Algae and Cyanobacteria Through Anaerobic Digestion. A Review, Analysis, and Research Needs.* (J. W. Lee, Ed.). New York, NY: Springer New York. doi:10.1007/978-1-4614-3348-4
- Borowitzka, M. a. (1999). Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnology*, 70, 313–321. doi:10.1016/S0168-1656(99)00083-8
- Borowitzka, M. A., & Moheimani, N. R. (2010). Sustainable biofuels from algae. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18(1), 13–25. doi:10.1007/s11027-010-9271-9

- Borowitzka, M., Boruff, B., & Moheimani, N. (2012). Identification of the Optimum Sites for Industrial-scale Microalgae Biofuel Production in WA using a GIS Model. Retrieved from http://www.murdoch.edu.au/_document/News/CRST-AlgaeBiofuelsGIS-FinalReportt.pdf
- BP. (2013). Biofuels production. Retrieved December 4, 2014, from <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/review-by-energy-type/renewable-energy/biofuels.html>
- BP. (2014). *BP Statistical Review of World Energy 2014 - Natural Gas*. Retrieved from <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf>
- Bravo, C., & Sáez, C. (2012). *Análisis económico-energético del uso de biomasa microalgal para la producción de bioenergía en Chile [Economic and energy analysis of the use of microalgal biomass for bioenergy production in Chile]. Memoria de título*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Bravo-Fritz, C. P., Sáez-Navarrete, C. a., Herrera Zeppelin, L. a., & Ginocchio Cea, R. (2015). Site selection for microalgae farming on an industrial scale in Chile. *Algal Research*, 11, 343–349. doi:10.1016/j.algal.2015.07.012
- Brentner, L. B., Eckelman, M. J., & Zimmerman, J. B. (2011). Combinatorial life cycle assessment to inform process design of industrial production of algal biodiesel. *Environmental Science and Technology*, 45, 7060–7067. doi:10.1021/es2006995
- Budds, J. (2004). Power, Nature and Neoliberalism: the Political Ecology of Water in Chile. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 25(3), 322–342. doi:10.1111/j.0129-7619.2004.00189.x
- Buswell, a. M., & Mueller, H. F. (1952). Mechanism of Methane Formation. *Industrial and Engineering Chemistry*, 44(3), 550–552. doi:10.1021/ie50507a033
- Chen, C. Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J., & Chang, J. S. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*, 102(1), 71–81. doi:10.1016/j.biortech.2010.06.159
- Chen, P. H. (1987). *Factors influencing methane fermentation of micro-algae*. California Univ., Berkeley (USA). Retrieved from <http://www.osti.gov/scitech/biblio/6382014>
- Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresource Technology*, 99, 4044–4064. doi:10.1016/j.biortech.2007.01.057

- Chiletur COPEC. (2014). Mapas Chiletur [Chiletur maps]. Retrieved June 12, 2014, from <http://www.chileturcopec.cl/contenido/mapas>
- Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294–306. doi:10.1016/j.biotechadv.2007.02.001
- Chisti, Y. (2008). Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends in Biotechnology*, 26(3), 126–31. doi:10.1016/j.tibtech.2007.12.002
- Chiu, S.-Y., Kao, C.-Y., Tsai, M.-T., Ong, S.-C., Chen, C.-H., & Lin, C.-S. (2009). Lipid accumulation and CO₂ utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration. *Bioresource Technology*, 100(2), 833–8. doi:10.1016/j.biortech.2008.06.061
- CNE. (2013). Capacidad instalada por sistema eléctrico nacional [Instaled capacity for national electric system]. Comisión Nacional de Energía. Retrieved from <http://www.cne.cl/estadisticas/energia/electricidad>
- CNE, PNUD, & UTFSM. (2008). *Irradiancia solar en territorios de la República de Chile - Registro solarimétrico* [Solar irradiance in territories of the Republic of Chile - Solarimetric Register]. Santiago, Chile.
- COCHILCO. (2015). *Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2014-2025* [Projected water consumption in copper mining 2014-2025]. Retrieved from <http://www.cochilco.cl/estudios/tema-sust-agua.asp>
- Collet, P., Hélias, A., Lardon, L., Ras, M., Goy, R.-A., & Steyer, J.-P. (2011). Life-cycle assessment of microalgae culture coupled to biogas production. *Bioresource Technology*, 102(1), 207–14. doi:10.1016/j.biortech.2010.06.154
- Comisión Nacional de Energía (CNE). (2014). Precios de nudo SIC - SING - Aysén y Magallanes [Node prices SIC-SING-SMA-SMM]. Retrieved February 23, 2015, from <http://www.cne.cl/estadisticas/energia/electricidad>
- Dassey, A. J., Hall, S. G., & Theegala, C. S. (2014). An analysis of energy consumption for algal biodiesel production: Comparing the literature with current estimates. *Algal Research*, 4, 89–95. doi:10.1016/j.algal.2013.12.006
- Davis, R., Aden, A., & Pienkos, P. T. (2011). Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. *Applied Energy*, 88(10), 3524–3531. doi:10.1016/j.apenergy.2011.04.018
- De Boer, K., Moheimani, N. R., Borowitzka, M. A., & Bahri, P. A. (2012). Extraction and conversion pathways for microalgae to biodiesel: A review focused on energy

- consumption. *Journal of Applied Phycology*, 24, 1681–1698. doi:10.1007/s10811-012-9835-z
- Del Campo, S. (2012). Estrategia Nacional de Energía 2012-2030. Energía para el futuro [National Energy Strategy 2012-2030. Energy for the Future]. Santiago, Chile.
- Delrue, F., Setier, P. a., Sahut, C., Cournac, L., Roubaud, a., Peltier, G., & Froment, a. K. (2012). An economic, sustainability, and energetic model of biodiesel production from microalgae. *Bioresource Technology*, 111, 191–200. doi:10.1016/j.biortech.2012.02.020
- DMC. (2012). *Dirección Metereológica de Chile - Anuarios climatológicos de Chile* [Meteorological Service of Chile - Yearbooks climatological of Chile]. Santiago, Chile. Retrieved from <http://164.77.222.61/climatologia/>
- Drapcho, C., Nhuan, N., & Walker, T. (2008). *Biofuels engineering process technology*. McGraw Hill Professional. doi:10.1036/0071487492
- Driver, T., Bajhaiya, A., & Pittman, J. K. (2014). Potential of Bioenergy Production from Microalgae. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 1(3), 94–103. doi:10.1007/s40518-014-0011-8
- Ehimen, E. a, Connaughton, S., Sun, Z. F., & Carrington, G. C. (2009). Energy recovery from lipid extracted, transesterified and glycerol codigested microalgae biomass. *Global Change Biology Bioenergy*, 1, 371–381. doi:10.1111/j.1757-1707.2009.01029.x
- Ehimen, E. a., Sun, Z. F., & Carrington, C. G. (2010). Variables affecting the in situ transesterification of microalgae lipids. *Fuel*, 89(3), 677–684. doi:10.1016/j.fuel.2009.10.011
- Ehimen, E. a., Sun, Z. F., Carrington, C. G., Birch, E. J., & Eaton-Rye, J. J. (2011). Anaerobic digestion of microalgae residues resulting from the biodiesel production process. *Applied Energy*, 88(10), 3454–3463. doi:10.1016/j.apenergy.2010.10.020
- EIA. (2013). EIA projects world energy consumption will increase 56% by 2040. Retrieved February 11, 2015, from <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=12251>
- El-Mashad, H. M. (2013). Kinetics of methane production from the codigestion of switchgrass and *Spirulina platensis* algae. *Bioresource Technology*, 132, 305–312. doi:10.1016/j.biortech.2012.12.183

- FAOSTAT. (n.d.). Resources. Land 2001-2011. Retrieved June 4, 2014, from <http://faostat3.fao.org/faostat-gateway/go/to/home/E>
- Farrell, A. E., Plevin, R. J., Turner, B. T., Jones, A. D., O'Hare, M., & Kammen, D. M. (2006). Ethanol Can Contribute to Energy and Environmental Goals. *Science*, 311(June), 506–509. doi:10.1126/science.1121416
- Ferrel, J., & Sarisky-Reed, V. (2010). *National algal biofuels technology roadmap*. US Department of Energy, Office of Energy Efficiency Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:National+Algal+Biofuels+Technology+Roadmap#0>
- Frigon, J. C., Matteau-Lebrun, F., Hamani Abdou, R., McGinn, P. J., O'Leary, S. J. B., & Guiot, S. R. (2013). Screening microalgae strains for their productivity in methane following anaerobic digestion. *Applied Energy*, 108, 100–107. doi:10.1016/j.apenergy.2013.02.051
- García, a. E., Carmona, R. J., Lienqueo, M. E., & Salazar, O. (2011). The current status of liquid biofuels in Chile. *Energy*, 36(4), 2077–2084. doi:10.1016/j.energy.2010.06.005
- Garcia-Moscoso, J. L., Obeid, W., Kumar, S., & Hatcher, P. G. (2013). Flash hydrolysis of microalgae (*Scenedesmus* sp.) for protein extraction and production of biofuels intermediates. *Journal of Supercritical Fluids*, 82(x), 183–190. doi:10.1016/j.supflu.2013.07.012
- GEF Project, & IDE Chile. (n.d.). Mapas de áreas protegidas de Chile [Protected areas maps of Chile]. Retrieved June 4, 2014, from <http://www.proyectogefareasprotegidas.cl/recursos/mapas/>
- Gentile, M. P., & Blanch, H. W. (2001). Physiology and xanthophyll cycle activity of *Nannochloropsis gaditana*. *Biotechnology and Bioengineering*, 75, 1–12. doi:10.1002/bit.1158
- Georgianna, D. R., & Mayfield, S. P. (2012). Exploiting diversity and synthetic biology for the production of algal biofuels. *Nature*, 488(7411), 329–35. doi:10.1038/nature11479
- GlobalPetrolPrices. (2015). Diesel prices. Retrieved February 12, 2015, from <http://www.globalpetrolprices.com/>
- Graham-Rowe, D. (2011). Agriculture: Beyond food versus fuel. *Nature*, 474(7352), S6–S8. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1038/474S06a>

- Greenwell, H. C., Laurens, L. M. L., Shields, R. J., Lovitt, R. W., & Flynn, K. J. (2010). Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges. *Journal of the Royal Society, Interface / the Royal Society*, 7(46), 703–26. doi:10.1098/rsif.2009.0322
- Griffiths, M. J., & Harrison, S. T. L. (2009). Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production. *Journal of Applied Phycology*, 21(5), 493–507. doi:10.1007/s10811-008-9392-7
- Gurung, A., Van Ginkel, S. W., Kang, W. C., Qambrani, N. A., & Oh, S. E. (2012). Evaluation of marine biomass as a source of methane in batch tests: A lab-scale study. *Energy*, 43(1), 396–401. doi:10.1016/j.energy.2012.04.005
- Haas, M. J., & Wagner, K. (2011). Simplifying biodiesel production: The direct or in situ transesterification of algal biomass. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 113, 1219–1229. doi:10.1002/ejlt.201100106
- Halim, R., Danquah, M. K., & Webley, P. a. (2012). Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review. *Biotechnology Advances*, 30(3), 709–32. doi:10.1016/j.biotechadv.2012.01.001
- Hall, C. a. S., & Klitgaard, K. a. (2012). Energy return on investment. *Energy and the Wealth of Nations*, 309–320. doi:10.1007/978-1-4419-9398-4
- Harun, R., Davidson, M., Doyle, M., Gopiraj, R., Danquah, M., & Forde, G. (2011). Technoeconomic analysis of an integrated microalgae photobioreactor, biodiesel and biogas production facility. *Biomass and Bioenergy*, 35(1), 741–747. doi:10.1016/j.biombioe.2010.10.007
- Harun, R., Singh, M., Forde, G. M., & Danquah, M. K. (2010). Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1037–1047. doi:10.1016/j.rser.2009.11.004
- Huntley, M. E., & Redalje, D. G. (2006). *CO2 Mitigation and Renewable Oil from Photosynthetic Microbes: A New Appraisal. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* (Vol. 12). doi:10.1007/s11027-006-7304-1
- IEA. (2012). *International Energy Agency - World energy outlook 2012*. Paris, France.
- IGM. (2011). Instituto Geográfico Militar - Mapas IGM, mapa mudo esquicio de Chile [Military Geographical Institute - IGM maps, blank map sketch of Chile]. *Descargas gratuitas*. Retrieved June 12, 2014, from <http://www.igm.cl/>

- Jiang, L., Luo, S., Fan, X., Yang, Z., & Guo, R. (2011). Biomass and lipid production of marine microalgae using municipal wastewater and high concentration of CO₂. *Applied Energy*, 88(10), 3336–3341. doi:10.1016/j.apenergy.2011.03.043
- Jonker, J. G. G., & Faaij, a. P. C. (2013). Techno-economic assessment of micro-algae as feedstock for renewable bio-energy production. *Applied Energy*, 102, 461–475. doi:10.1016/j.apenergy.2012.07.053
- Khoo, H. H., Sharratt, P. N., Das, P., Balasubramanian, R. K., Naraharisetti, P. K., & Shaik, S. (2011). Life cycle energy and CO₂ analysis of microalgae-to-biodiesel: preliminary results and comparisons. *Bioresource Technology*, 102(10), 5800–7. doi:10.1016/j.biortech.2011.02.055
- Klise, G., Roach, J., & Passell, H. (2011). A study of algal biomass potential in selected canadian regions, (November). Retrieved from <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2011/118528.pdf>
- Lantz, M. (2012). The economic performance of combined heat and power from biogas produced from manure in Sweden - A comparison of different CHP technologies. *Applied Energy*, 98, 502–511. doi:10.1016/j.apenergy.2012.04.015
- Lardon, L., Hélias, A., Sialve, B., Steyer, J.-P., & Bernard, O. (2009). Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. *Environmental Science & Technology*, 43, 6475–6481. doi:10.1021/es900705j
- Lemmer, A., Naegele, H. J., & Sondermann, J. (2013). How efficient are agitators in biogas digesters? Determination of the efficiency of submersible motor mixers and incline agitators by measuring nutrient distribution in full-scale agricultural biogas digesters. *Energies*, 6, 6255–6273. doi:10.3390/en6126255
- Levine, R. B., Pinnarat, T., & Savage, P. E. (2010). Biodiesel production from wet algal biomass through in situ lipid hydrolysis and supercritical transesterification. *Energy and Fuels*, 24(11), 5235–5243. doi:10.1021/ef1008314
- Lundquist, T. J., Woertz, I. C., Quinn, N. W. T., & Benemann, J. R. (2010). A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production. *Energy ...* Retrieved from http://digitalcommons.calpoly.edu/cenv_fac/188/
- Ma, F., & Hanna, M. a. (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresource Technology*, 70, 1–15. doi:10.1016/S0960-8524(99)00025-5
- Mao, J., Cao, X., Chen, N., Brennan, L., & Owende, P. (2013). *Advanced Biofuels and Bioproducts. Chapter 24. Biofuels from Microalgae: Towards Meeting Advanced Fuel Standards.* doi:10.1007/978-1-4614-3348-4

- MAPS Chile. (2012). *Escenarios referenciales para la mitigación del cambio climático. Resultados de la fase 1 [Reference scenarios for climate change mitigation. Phase 1 results]*. Santiago, Chile. Retrieved from <http://www.mapschile.cl/>
- Mata, T. M., Martins, A. a., & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217–232. doi:10.1016/j.rser.2009.07.020
- Maxwell, E. L., Folger, A. G., & Hogg, S. (1985). Resource Evaluation and Site Selection for Microalgae Production Systems.
- Milbrandt, A., & Jarvis, E. (2010). Resource evaluation and site selection for microalgae production in India. *National Renewable Energy Laboratory*, (September).
- MinE. (2013). *Ministerio de Energía - Balance Nacional de Energía 2012 [Energy Ministry - National Energy Balance 2012]*. Santiago, Chile. Retrieved from http://antiguo.minenergia.cl/minwww/opencms/14_portal_informacion/06_Estadisticas/Balances_Energ.html
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MinVU). (2011). Tablas de Costo Unitario - Estadísticas - Biblioteca. Retrieved February 25, 2015, from http://www.minvu.cl/opensite_20101005084843.aspx#
- MinVU. Fija valores unitarios de construcción para aplicar en cálculos de derechos de permisos municipales (2001). Chile: INE. Retrieved from http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_economicas/edificacion/metodologia/pdf/metodologia2.pdf
- Molina Grima, E., Belarbi, E.-H., Acien Fernández, F. G., Robles Medina, a, & Chisti, Y. (2003). Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnology Advances*, 20(7-8), 491–515. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/14550018>
- Mueller, S. a., Anderson, J. E., & Wallington, T. J. (2011). Impact of biofuel production and other supply and demand factors on food price increases in 2008. *Biomass and Bioenergy*, 35(5), 1623–1632. doi:10.1016/j.biombioe.2011.01.030
- Mussnug, J. H., Klassen, V., Schlüter, a, & Kruse, O. (2010). Microalgae as substrates for fermentative biogas production in a combined biorefinery concept. *Journal of Biotechnology*, 150(1), 51–6. doi:10.1016/j.jbiotec.2010.07.030
- Nagarajan, S., Chou, S. K., Cao, S., Wu, C., & Zhou, Z. (2013). An updated comprehensive techno-economic analysis of algae biodiesel. *Bioresource Technology*, 145, 150–6. doi:10.1016/j.biortech.2012.11.108

- National Research Council. (2010). Advancing the Science of Climate Change, 489. Retrieved from http://dgs.stanford.edu/labs/caldeiralab/Caldeira_research/pdf/ACC_Science_2010.pdf
- Nielsen, H. B., & Heiske, S. (2011). Anaerobic digestion of macroalgae: Methane potentials, pre-treatment, inhibition and co-digestion. *Water Science and Technology*, 64(Hills 1979), 1723–1729. doi:10.2166/wst.2011.654
- NOAA. (2015). Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. *Products - Trends in CO2 - Global*. Retrieved February 16, 2015, from <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>
- NREL - DOE. (2008). *Microalgae feedstocks for biofuels production*. Report to Congress (EISA 2007 - Section 228).
- Passos, F., & Ferrer, I. (2015). Influence of hydrothermal pretreatment on microalgal biomass anaerobic digestion and bioenergy production. *Water Research*, 68, 364–373. doi:10.1016/j.watres.2014.10.015
- Pate, R., Klise, G., & Wu, B. (2011). Resource demand implications for US algae biofuels production scale-up. *Applied Energy*, 88(10), 3377–3388. doi:10.1016/j.apenergy.2011.04.023
- Perlack, R. D., Wright, L. L., Turhollow, A. F., Graham, R. L., Stokes, B. J., & Erbach, D. C. (2005). Biomass as Feedstock for a Bioenergy and Bioproducts Industry : The Technical Feasibility of a Billion-Ton Annual Supply. *Agriculture, DOE/GO-102*, 78. doi:10.2172/885984
- Petrack, I., Dombrowski, L., Kröger, M., Beckert, T., Kuchling, T., & Kureti, S. (2013). *Algae Biorefinery – Material and energy use of algae. Chapter 8. Biogas production*. Retrieved from <http://www.dbfz.de/web/en/publications/dbfz-reports.html>
- Phatarpekar, P. V., Sreepada, R. a., Pednekar, C., & Achuthankutty, C. T. (2000). A comparative study on growth performance and biochemical composition of mixed culture of *Isochrysis galbana* and *Chaetoceros calcitrans* with monocultures. *Aquaculture*, 181, 141–155. doi:10.1016/S0044-8486(99)00227-6
- Pienkos, P. T. (2008). *Historical overview of algal biofuel technoeconomic analyses*. Retrieved from <http://www.nrel.gov/docs/fy09osti/45622.pdf>
- Pokoo-Aikins, G., Nadim, A., El-Halwagi, M. M., & Mahalec, V. (2010). Design and analysis of biodiesel production from algae grown through carbon sequestration.

Clean Technologies and Environmental Policy, 12, 239–254. doi:10.1007/s10098-009-0215-6

- Pöschl, M., Ward, S., & Owende, P. (2010). Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways. *Applied Energy*, 87, 3305–3321. doi:10.1016/j.apenergy.2010.05.011
- Qin, Z., Zhuang, Q., & Chen, M. (2012). Impacts of land use change due to biofuel crops on carbon balance, bioenergy production, and agricultural yield, in the conterminous United States. *GCB Bioenergy*, 4(3), 277–288. doi:10.1111/j.1757-1707.2011.01129.x
- Quinn, J. C., Catton, K., Wagner, N., & Bradley, T. H. (2011). Current Large-Scale US Biofuel Potential from Microalgae Cultivated in Photobioreactors. *BioEnergy Research*, 5(1), 49–60. doi:10.1007/s12155-011-9165-z
- Ras, M., Lardon, L., Bruno, S., Bernet, N., & Steyer, J. P. (2011). Experimental study on a coupled process of production and anaerobic digestion of *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, 102(1), 200–206. doi:10.1016/j.biortech.2010.06.146
- Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., & Bux, F. (2013). Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. *Applied Energy*, 103, 444–467. doi:10.1016/j.apenergy.2012.10.004
- Razon, L. F., & Tan, R. R. (2011). Net energy analysis of the production of biodiesel and biogas from the microalgae: *Haematococcus pluvialis* and *Nannochloropsis*. *Applied Energy*, 88(10), 3507–3514. doi:10.1016/j.apenergy.2010.12.052
- Ribeiro, L. A., & Silva, P. P. Da. (2013). Surveying techno-economic indicators of microalgae biofuel technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 89–96. doi:10.1016/j.rser.2013.03.032
- Richardson, J. W., Johnson, M. D., & Outlaw, J. L. (2012). Economic comparison of open pond raceways to photo bio-reactors for profitable production of algae for transportation fuels in the Southwest. *Algal Research*, 1(1), 93–100. doi:10.1016/j.algal.2012.04.001
- Richmond, A. (2004). Handbook of microalgal culture. *Biotechnology and Applied Phycology John Wiley & Sons*, 577. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Handbook+of+Microalgal+Culture#2>

- Richmond, A., & Cheng-Wu, Z. (2001). Optimization of a flat plate glass reactor for mass production of *Nannochloropsis* sp. outdoors. *Journal of Biotechnology*, 85, 259–269. doi:10.1016/S0168-1656(00)00353-9
- Ryan, C., Hartley, A., Browning, B., Garvin, C., Greene, N., & Steger, C. (2009). Cultivating Clean Energy - The Promise of Algae Biofuels, (October). Retrieved from <http://www.nrdc.org/energy/cultivating.asp>
- Salerno, M., Nurdogan, Y., & Lundquist, T. J. (2009). Biogas Production from Algae Biomass Harvested at Wastewater Treatment Ponds. *Bioenergy Engineering Conference*.
- Samson, R., & Leduy, A. (1983). Influence of mechanical and thermochemical pretreatments on anaerobic digestion of *Spirulina maxima* algal biomass. *Biotechnology Letters*, 5, 671–676. doi:10.1007/bf01386360
- Sathish, A., Smith, B. R., & Sims, R. C. (2014). Effect of moisture on in situ transesterification of microalgae for biodiesel production. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 89(January), 137–142. doi:10.1002/jctb.4125
- Schlatter, R. (2014). *Comparación de la sustentabilidad del diseño básico de operaciones unitarias secuenciales y el diseño de planta completa para una planta de producción de biodiesel desde microalgas [Comparison of the sustainability of basic design for unit operations...]*. Universidad de Chile.
- Schwede, S., Rehman, Z. U., Gerber, M., Theiss, C., & Span, R. (2013). Effects of thermal pretreatment on anaerobic digestion of *Nannochloropsis salina* biomass. *Bioresource Technology*, 143, 505–511. doi:10.1016/j.biortech.2013.06.043
- Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J., & Roessler, P. (1998). *Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae; Close-Out Report*. Golden, CO. doi:10.2172/15003040
- Sialve, B., Bernet, N., & Bernard, O. (2009). Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. *Biotechnology Advances*, 27(4), 409–16. doi:10.1016/j.biotechadv.2009.03.001
- Singh, A., Nigam, P. S., & Murphy, J. D. (2011). Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels. *Bioresource Technology*, 102(1), 26–34. doi:10.1016/j.biortech.2010.06.057
- Sinnott, R. K. (2005). Chemical Engineering Design: Coulson and Richardson's Chemical Engineering, Volume 6, 6, 1056. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=DJaxUL3numgC&pgis=1>

- SISS. (2013). Superintendencia de Servicios Sanitarios - Plantas de TAS en operación [Superintendence of Sanitary Services- Sewage treatment plants in operation]. Retrieved August 22, 2013, from <http://www.siss.gob.cl/577/w3-propertyvalue-3544.html>
- SMAC. (n.d.). Servicio Meteorológico de la Armada de Chile - Estado de puertos [Meteorological Service of the Chilean Navy - Sea port state]. Retrieved June 4, 2014, from <http://meteoarmada.directemar.cl/site/estadopuertos/estadopuertos.html>
- Song, Y. C., Kwon, S. J., & Woo, J. H. (2004). Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic- and thermophilic digestion of sewage sludge. *Water Research*, 38, 1653–1662. doi:10.1016/j.watres.2003.12.019
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., & Isambert, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(2), 87–96. doi:10.1263/jbb.101.87
- Su, C.-H., Chien, L.-J., Gomes, J., Lin, Y.-S., Yu, Y.-K., Liou, J.-S., & Syu, R.-J. (2010). Factors affecting lipid accumulation by *Nannochloropsis oculata* in a two-stage cultivation process. *Journal of Applied Phycology*, 23(5), 903–908. doi:10.1007/s10811-010-9609-4
- Subhadra, B. G. (2010). Sustainability of algal biofuel production using integrated renewable energy park (IREP) and algal biorefinery approach. *Energy Policy*, 38(10), 5892–5901. doi:10.1016/j.enpol.2010.05.043
- Sun, A., Davis, R., Starbuck, M., Ben-Amotz, A., Pate, R., & Pienkos, P. T. (2011). Comparative cost analysis of algal oil production for biofuels. *Energy*, 36(8), 5169–5179. doi:10.1016/j.energy.2011.06.020
- Ursu, A. V., Marcati, A., Sayd, T., Sante-Lhoutellier, V., Djelveh, G., & Michaud, P. (2014). Extraction, fractionation and functional properties of proteins from the microalgae *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, 157, 134–139. doi:10.1016/j.biortech.2014.01.071
- Van Gerpen, J. (2005). Biodiesel processing and production. *Fuel Processing Technology*, 86, 1097–1107. doi:10.1016/j.fuproc.2004.11.005
- Venteris, E. R., McBride, R. C., Coleman, A. M., Skaggs, R. L., & Wigmosta, M. S. (2014). Siting algae cultivation facilities for biofuel production in the United States: trade-offs between growth rate, site constructability, water availability, and infrastructure. *Environmental Science & Technology*, 48(6), 3559–66. doi:10.1021/es4045488

- Waste & Resources Action Programme (WRAP). (2009). *Anaerobic digestate*. WRAP Publications. Banbury, Oxon. Retrieved from http://www.organics-recycling.org.uk/uploads/category1060/Financial_impact_assessment_for_anaerobic_digestate.pdf
- Weiland, P. (2010). Biogas production: Current state and perspectives. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 85, 849–860. doi:10.1007/s00253-009-2246-7
- Weyer, K. M., Bush, D. R., Darzins, A., & Willson, B. D. (2010). Theoretical maximum algal oil production. *Bioenergy Research*, 3(2), 204–213. doi:10.1007/s12155-009-9046-x
- Wu, B., & Bibeau, E. (2006). Development of 3-D anaerobic digester heat transfer model for cold weather applications. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 49(3), 749–758. Retrieved from <http://www.prairieswine.com/pdf/3041.pdf>
- Yen, H.-W., & Brune, D. E. (2007). Anaerobic co-digestion of algal sludge and waste paper to produce methane. *Bioresource Technology*, 98(1), 130–4. doi:10.1016/j.biortech.2005.11.010
- Zamalloa, C., Vulsteke, E., Albrecht, J., & Verstraete, W. (2011). The techno-economic potential of renewable energy through the anaerobic digestion of microalgae. *Bioresource Technology*, 102(2), 1149–58. doi:10.1016/j.biortech.2010.09.017

ANEXOS

ANEXO A: DIAGRAMAS Y ALGUNOS SUPUESTOS DE LA EVALUACIÓN DE LOS ESCENARIOS Y OTROS DETALLES DEL MODELO

This Appendix is intended to provide relevant information regarding energy consumption and costs associated with the unit operations that constitute the alternative biorefinery models discussed in “Multi-scenario economic evaluation for a biorefinery based on microalgae biomass with application of anaerobic digestion”. Given the extent of this information it was impossible to include it in the article body.

The processes described below constitute the design basis of the model, and pertain to technologies defined on the state of the art. These technologies were grouped into four stages, as can be seen in Figure A.1. The technologies included in "Pre-treatment" group are those that define the 11 scenarios evaluated and discussed throughout the article.

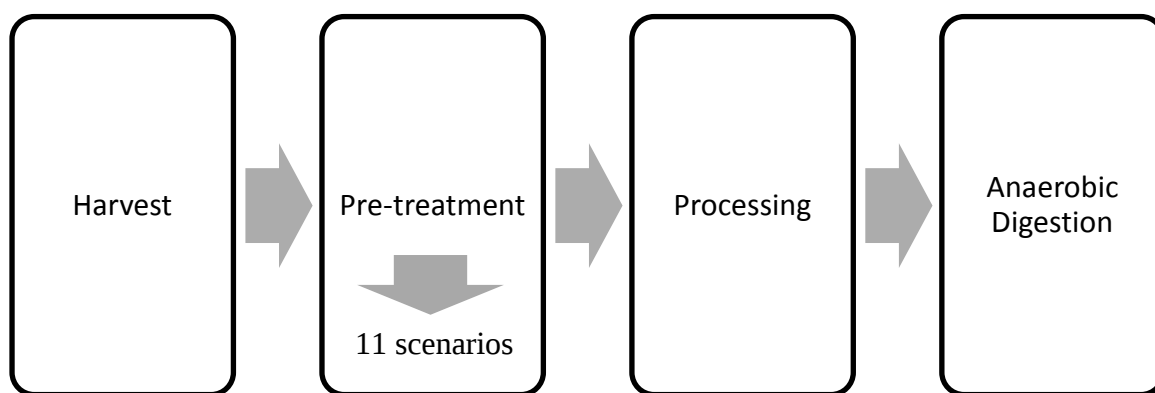


Figure A.1: Four principal groups of process modeled in this article

Description of the scenarios and the main process involved

Harvest process

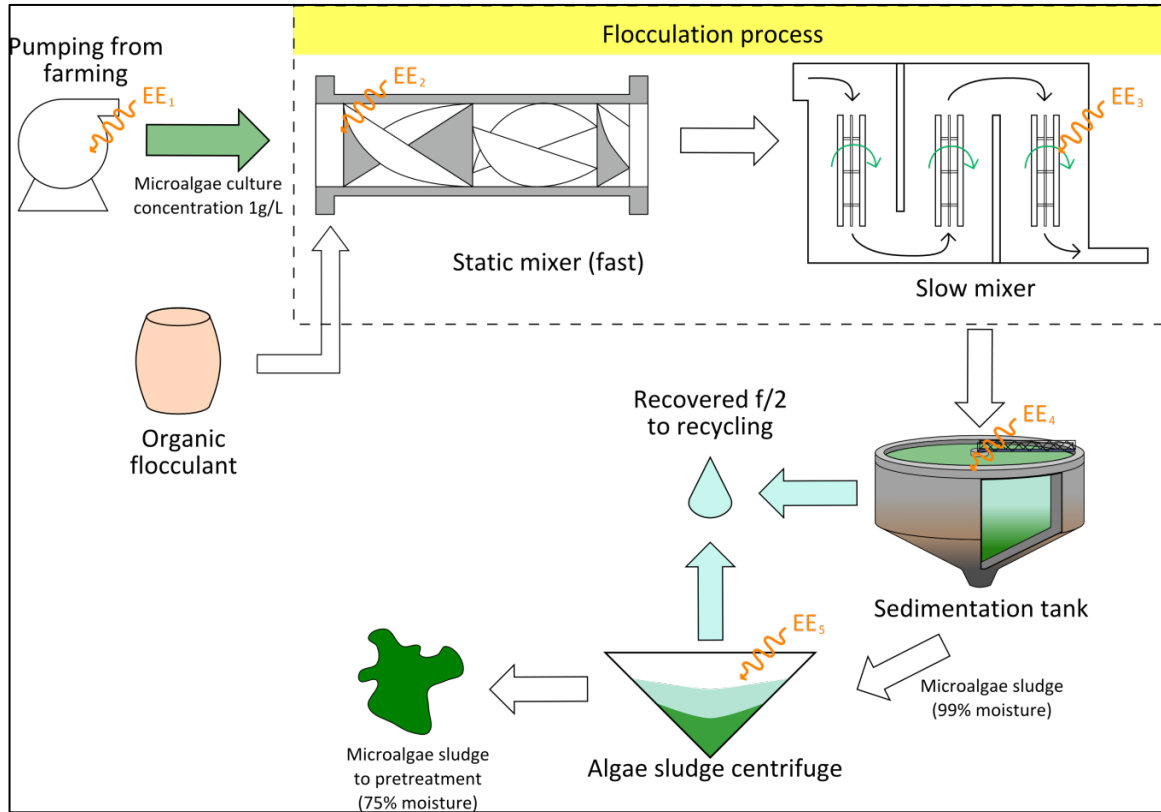


Figure A.2: Harvest process diagram and its involved technologies.

Table A.1: Energy, technical and economic characteristics associated to the technologies of the harvest process.

Equipment	Energy consumption	Maximum unitary capacity	Approx. capital cost (US\$/unit)
Farming pumps	0.1kWh/m ³	3000m ³ /h	24,000
Fast flocculation: Dosage pump	~0.2kWh/m ³	~50L/min	~250
Fast flocculation: Static mixer	-	5-12,000L/min	200-700
Slow flocculation: Tank	-	22-1,300m ³	2,000-28,000
Slow flocculation: Paddle wheel	-	-	150-1,600
Slow flocculation: Gearmotor	0.5-5.5kW	-	950-3000
Sedimentator	0.0035kWh/m ³	58-3,800m ³	3,000-40,000
Microalgae centrifuge	1.4kWh/m ³	1-40m ³ /h	50,000-480,000

Pre-treatment processes and different scenarios

1) Baseline (BL)

Nothing happens; the post-centrifuged algae sludge goes directly to the processing BL scenarios (see Figure A.14). This scenario is defined to have a comparison with the traditional technologies defined in the state of the art.

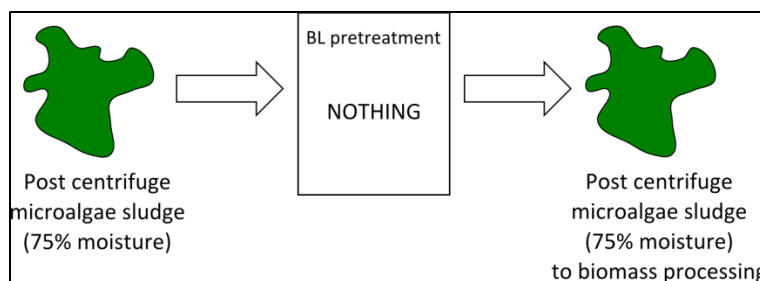


Figure A.3: BL pre-treatment process diagram.

2) Direct anaerobic digestion (DAD)

Nothing happens, the post-centrifuged algae sludge goes directly to AD process for energy and digestate generation (see AD process in Figure A.19).

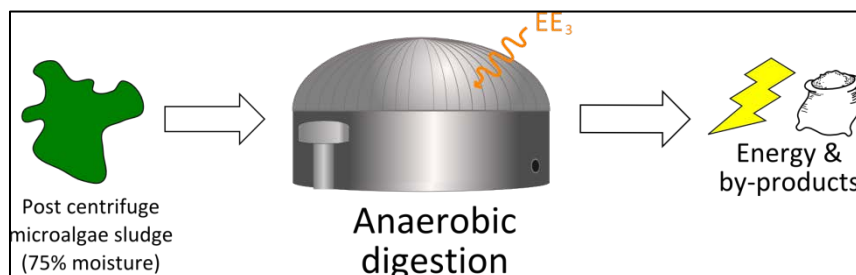


Figure A.4: DAD pre-treatment process diagram.

3) Protein extraction (PE)

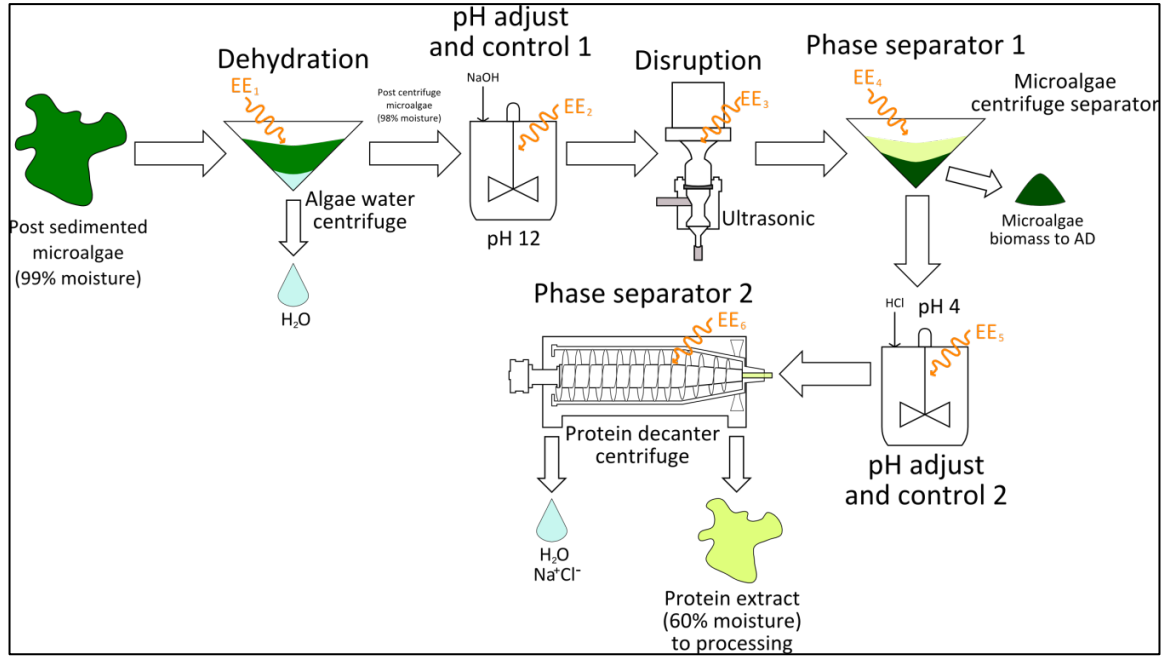


Figure A.5: PE pre-treatment process diagram and its involved technologies.

Table A.2: Energy, technical and economic characteristics associated to the technologies of PE scenario.

Equipment	Energy consumption	Maximum unitary capacity	Approx. capital cost (US\$/unit)
Dehydration: Microalgae centrifuge	1.2kWh/m ³	1-40m ³ /h	50,000-480,000
pH control 1: Reactor tank	-	200m ³	180,000
pH control 1: NaOH dosage pump	~1kWh/m ³	0.6m ³ /h	9,000
Disruption: Ultrasound	8kWh/m ³	10m ³ /h	127,000
Disruption: Tank	-	2.3m ³	3,200
Phase separator: Protein centrifuge 1	1.1kWh/m ³	25m ³ /h	40,000
pH control 2: Reactor tank	-	200m ³	180,000
pH control 2: HCl dosage pump	~1kWh/m ³	0.6m ³ /h	9,000
pH control 2: Sedimentator	0.0035kWh/m ³	1300m ³	300,000
Phase separator: Protein centrifuge 2	1.7kWh/m ³	14m ³ /h	30,000

4) Lipid extraction (LE)

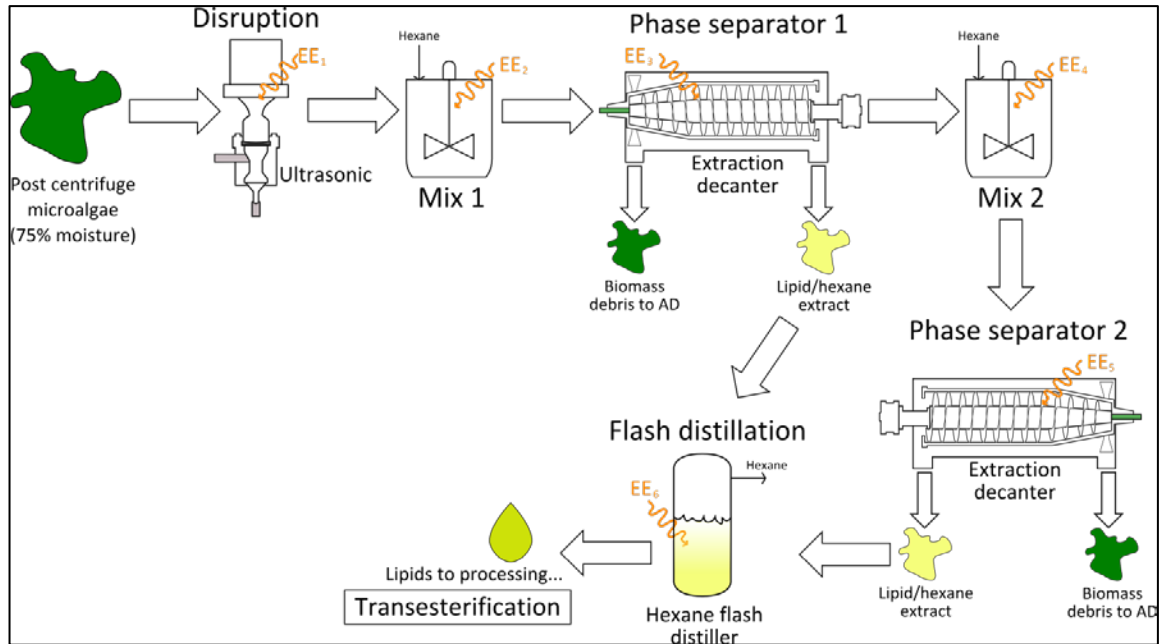


Figure A.6: LE pre-treatment process diagram and its involved technologies.

Table A.3: Energy, technical and economic characteristics associated to the technologies of LE scenario.

Equipment	Energy consumption	Maximum unitary capacity	Approx. capital cost (US\$/unit)
Disruption: Ultrasound	8kWh/m ³	10m ³ /h	127,000
Disruption: Tank	-	2.3m ³	3,200
Extraction tank 1	EE: 0.003kWh/m ³ and HE: 4kWh/m ³	18m ³	50,000
Phase separator: Decanter 1	EE: 1kWh/m ³	120m ³ /h	60,000
Extraction tank 2	EE: 0.003kWh/m ³ and HE: 4kWh/m ³	18m ³	50,000
Phase separator: Decanter 2	EE: 1kWh/m ³	120m ³ /h	60,000
Flash distillation	10kWh/m ³	18m ³ /h	20,000

EE=electric energy and HE=heat energy

5) *In Situ* transesterification (TiS)

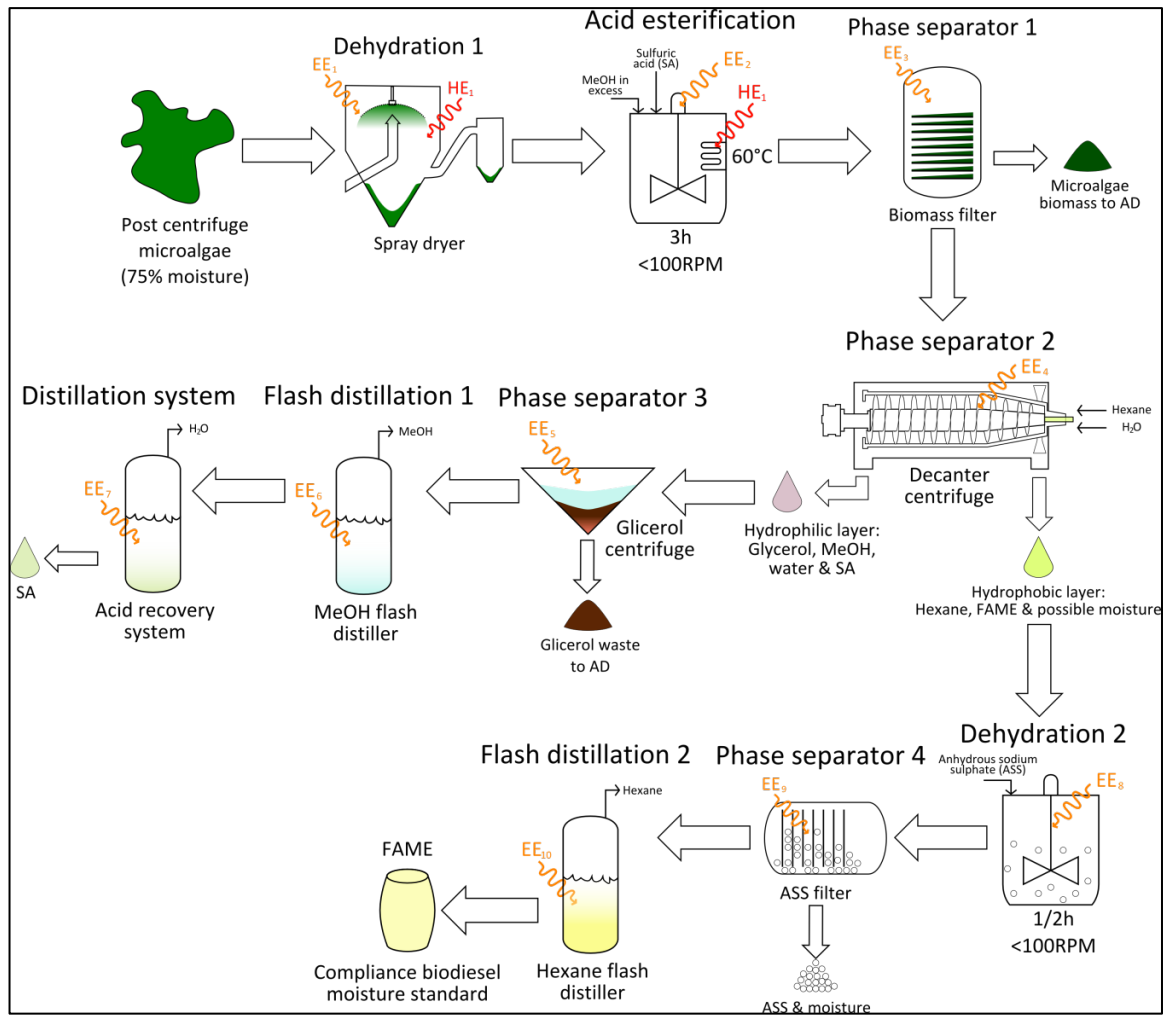


Figure A.7: TiS pre-treatment process diagram and its involved technologies.

Table A.4: Energy, technical and economic characteristics associated to the technologies of TiS scenario.

Equipment	Energy consumption	Maximum unitary capacity	Approx. capital cost (US\$/unit)
Dehydration 1: Spray dryer	EE: 0.2kWh/kg product and HE: 2kWh/kg product	1.5ton/h	25,000
Acid esterification tank	EE: 0.26kWh/m ³ and HE: for heating to 60°C	18m ³	50,000
Phase separator 1: Biomass filter	0.88kWh/m ³	180m ²	250,000
Phase separator 2: Decanter centrifuge	1.6kWh/m ³	0.4-13m ³ /h	2,000-15,000
Hydrophilic route			
Phase separator 3: Glycerol centrifuge	2kWh/m ³	10m ³ /h	40,000
Flash distillation 1: Methanol	10kWh/m ³	18m ³ /h	20,000
Distillation system: Sulfuric acid	10kWh/m ³	20m ³ /h	30,000
Hydrophobic route			
Dehydration 2: Reactor	EE: 0.26kWh/m ³	18m ³	50,000
Phase separator 4: ASS filter	0.88kWh/m ³	180m ²	250,000
Flash distillation 2: Hexane	10kWh/m ³	18m ³ /h	20,000
FAME storage	-	350m ³	50,000

ASS=Anhydrous sodium sulphate, EE=electric energy and HE=heat energy

6) Co-digestion (CoD)

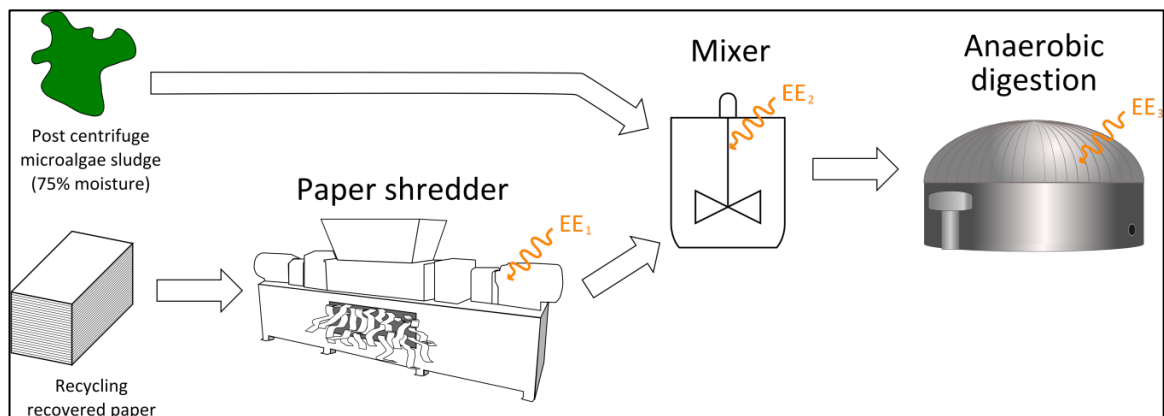


Figure A.8: CoD pre-treatment process diagram and its involved technologies.

Table A.5: Energy, technical and economic characteristics associated to the technologies of CoD scenario.

Equipment	Energy consumption	Maximum unitary capacity	Approx. capital cost (US\$/unit)
Paper shredder	25kWh/ton	4ton/h	60,000
Mixer	0.71kWh/ton	3.2m ³	15,000

7) Cellular disruption (CDisr)

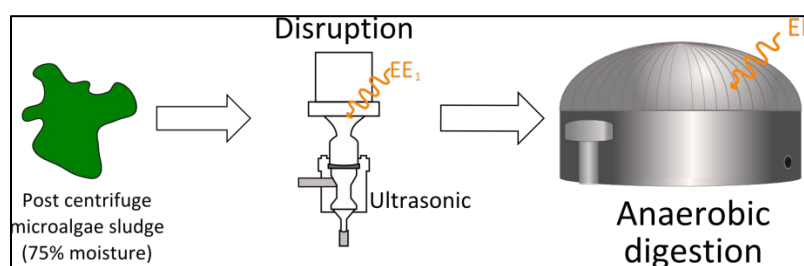


Figure A.9: CDisr pre-treatment process diagram and its involved technologies.

Table A.6: Energy, technical and economic characteristics associated to the technologies of CoD scenario.

Equipment	Energy consumption	Maximum unitary capacity	Approx. capital cost (US\$/unit)
Disruption: Ultrasound	8kWh/m ³	10m ³ /h	127,000
Disruption: Tank	-	2.3m ³	3,200

8) Cellular disruption follow by Co-digestion (CDisr+CoD)

This scenario is a combination of the previous two pre-treatments (CDisr and CoD).

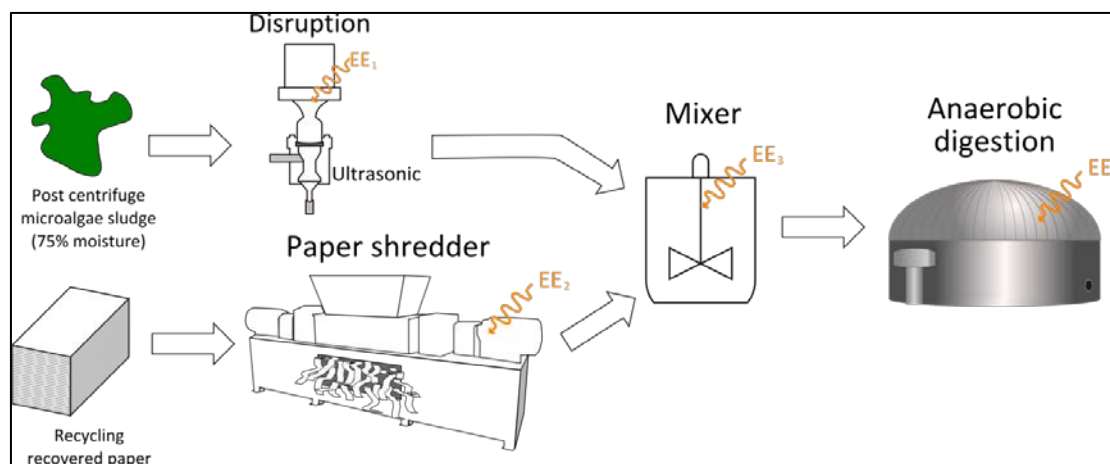


Figure A.10: CDisr+CoD pre-treatment process diagram and its involved technologies.

9) Cellular disruption follow by Co-digestion (PE+CoD)

This scenario is a combination of PE (see Figure A.5) and CoD (see Figure A.8) processes.

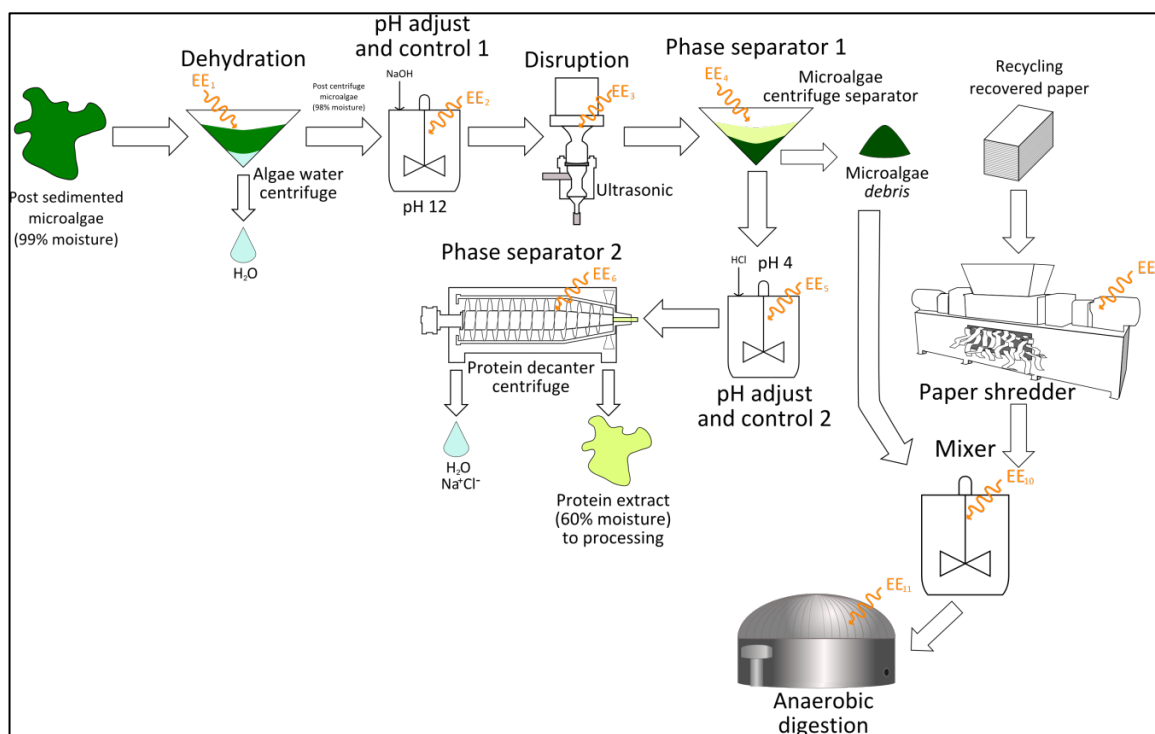


Figure A.11: PE+CoD pre-treatment process diagram and its involved technologies.

10) Lipid extraction follow by Co-digestion (LE+CoD)

This scenario is a combination of LE (see Figure A.6) and CoD (see Figure A.8) processes.

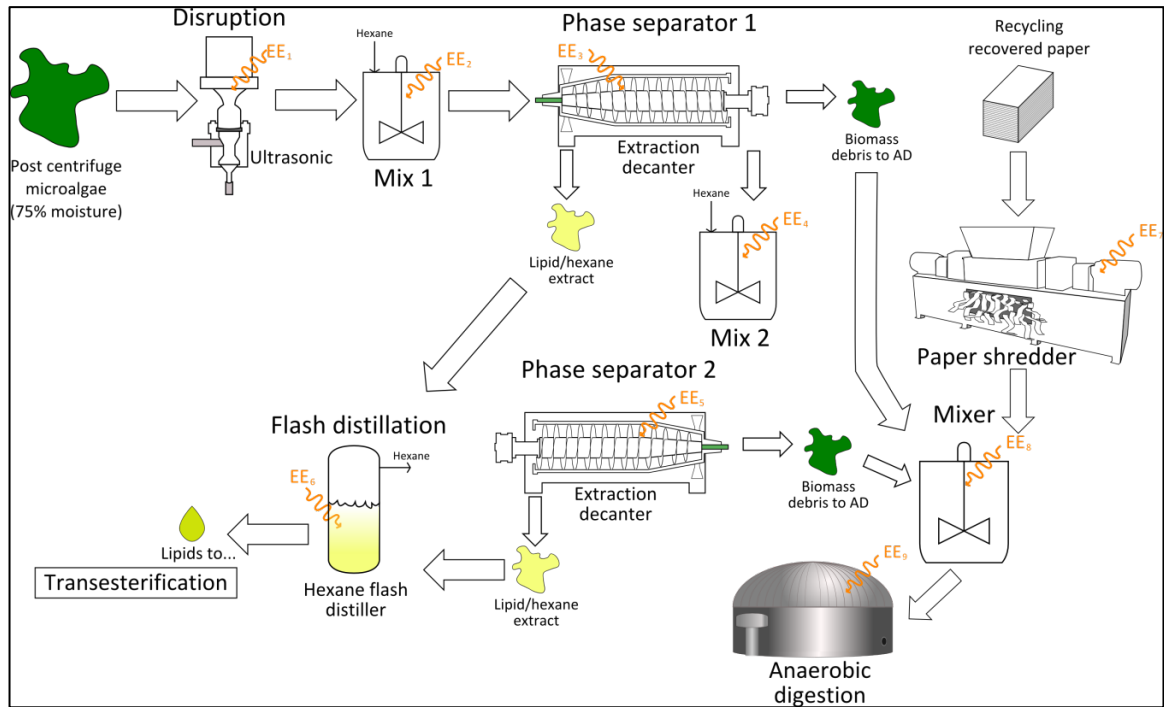


Figure A.12: LE+CoD pre-treatment process diagram and its involved technologies.

11) *In situ* transesterification follow by co-digestión (TiS+CoD)
This scenario is a combination of TiS (see Figure A.7) and CoD (see Figure A.8) processes.

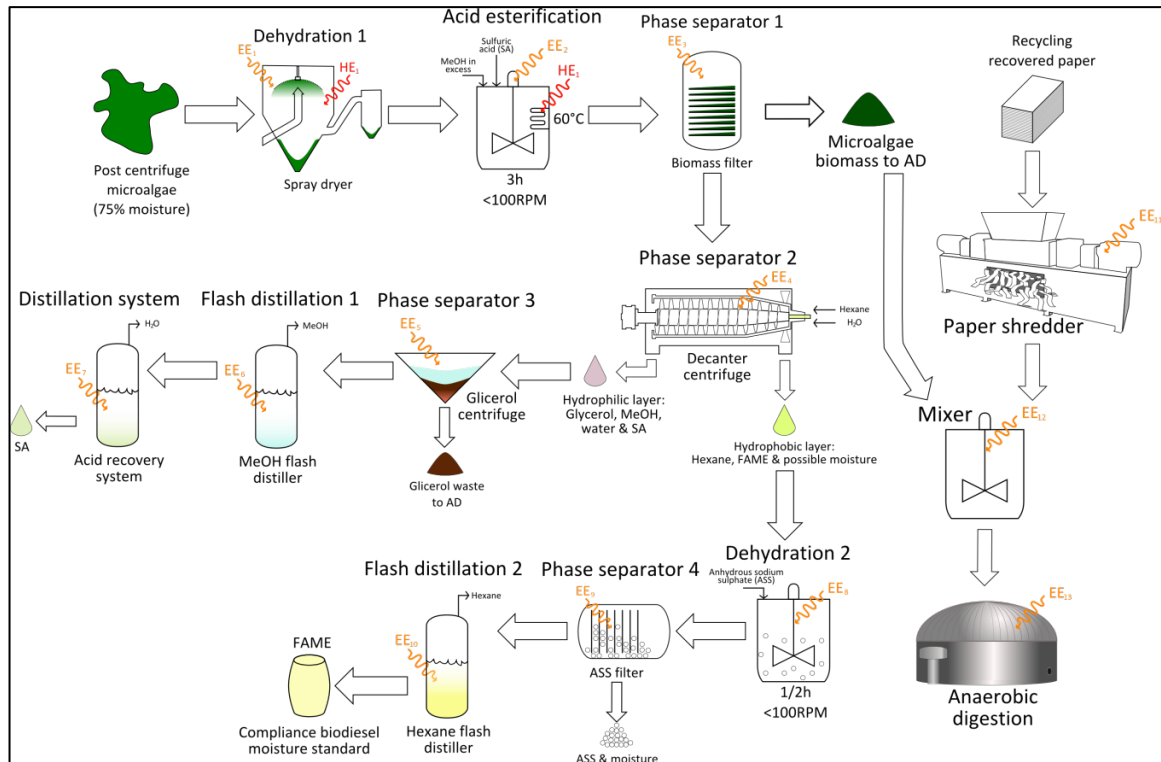


Figure A.13: LE+CoD pre-treatment process diagram and its involved technologies.

Scenarios with processing stage

1) BL

As discussed above in BL pre-treatment scenario 1), the post-centrifuge microalgae sludge passes directly to processing as can be seen in Figure A.14. This are the defined traditional technologies according to the state of the art.

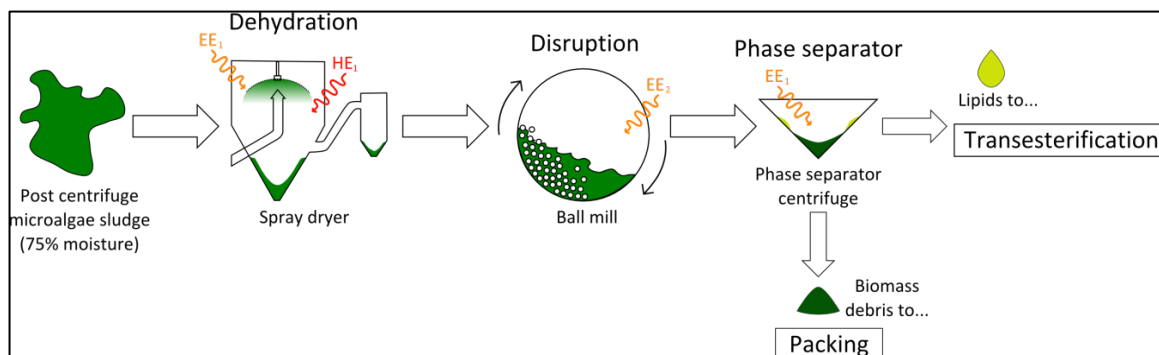


Figure A.14: BL processing diagram and its involved technologies.

Table A.7: Energy, technical and economic characteristics associated to the technologies of BL processing scenario.

Equipment	Energy consumption	Maximum unitary capacity	Approx. capital cost (US\$/unit)
Dehydration: Spray dryer	EE: 0.2kWh/kg product and HE: 2kWh/kg product	1.5ton/h	25,000
Disruption: Ball mill	14kWh/ton	75ton/h	200,000
Phase separator: Lipids/biomass centrifuge	1kWh/m ³	3.5m ³ /h	40,000

EE=electric energy and HE=heat energy

2) PE and PE+CoD

The protein extract obtained at the end of PE and PE + CoD, is subjected to the processing of Figure A.15.

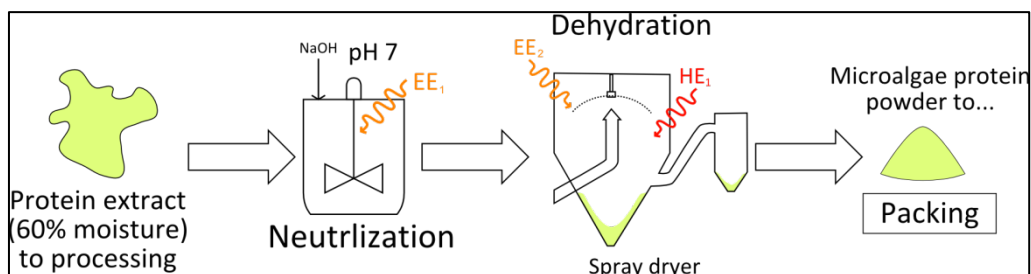


Figure A.15: PE and PE+CoD processing diagram and its involved technologies.

Table A.8: Energy, technical and economic characteristics associated to the technologies of PE and PE+CoD processing scenario.

Equipment	Energy consumption	Maximum unitary capacity	Approx. capital cost (US\$/unit)
pH Neutralization Reactor tank	-	200m ³	180,000
pH Neutralization: NaOH dosage pump	~1kWh/m ³	0.6m ³ /h	9,000
Dehydration: Spray dryer	EE: 0.2kWh/kg product and HE: 2kWh/kg product EE=electric energy and HE=heat energy	1.5ton/h	25,000

3) LE and LE+CoD

The lipids pass directly to transesterification stage, which is described in Figure A.17.

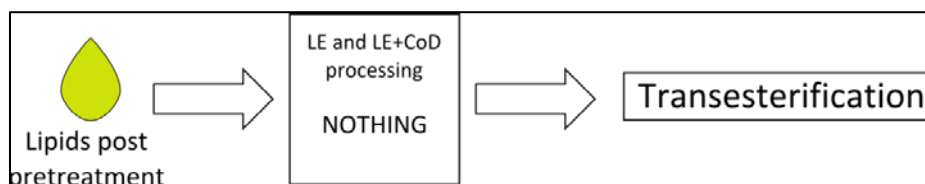


Figure A.16: LE and LE+CoD processing diagram.

Transesterification

This processing is included in BL, LE and LE + CoD scenarios, where there is commercialization of biodiesel.

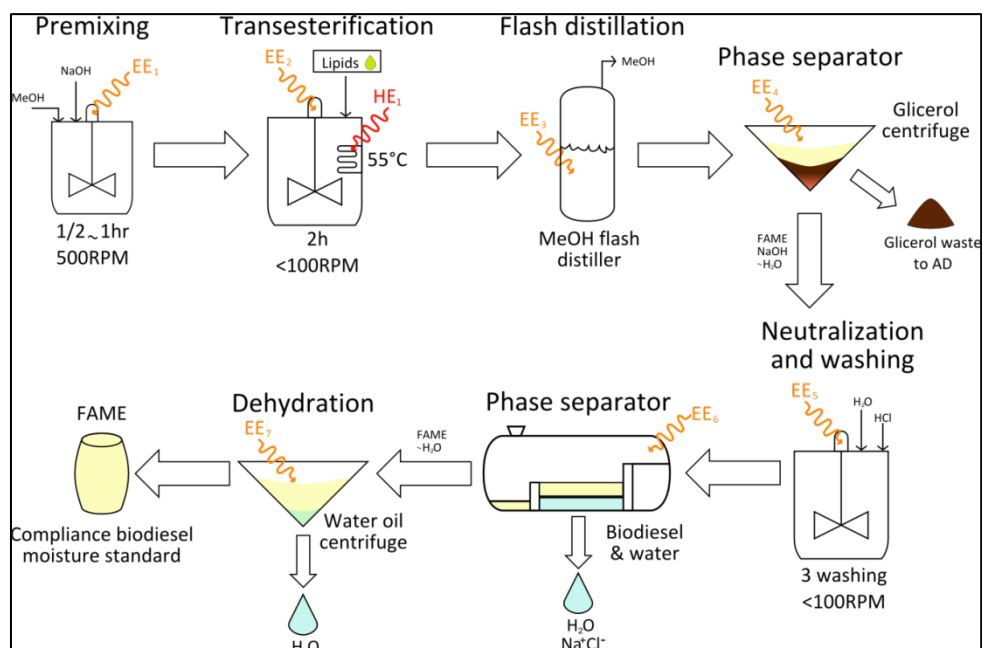


Figure A.17: Transesterification processing diagram and its involved technologies.

Table A.9: Energy, technical and economic characteristics associated to transesterification technologies.

Equipment	Energy consumption	Maximum unitary capacity	Approx. capital cost (US\$/unit)
Pre-mixer	0.26kWh/m ³	15m ³	9,000
Transesterification reactor	EE: 0.003kWh/m ³ and HE: 4kWh/m ³	18m ³	50,000
Flash distillation: Methanol	10kWh/m ³	18m ³ /h	20,000
Phase separator 1: Glycerol centrifuge	2kWh/m ³	10m ³ /h	40,000
Neutralization and washing	0.26kWh/m ³	15m ³	9,000
Phase separator 2	0.08kWh/m ³	3000m ³ /d	50,000
Dehydration: Biodiesel centrifuge	2kWh/m ³	7m ³ /h	40,000
FAME storage	-	350m ³	50,000

EE=electric energy and HE=heat energy

Packing

This processing is included in BL scenario, where exist commercialization of microalgae *debris* powder, and in PE and PE+CoD, where there is commercialization of a refined protein extract.

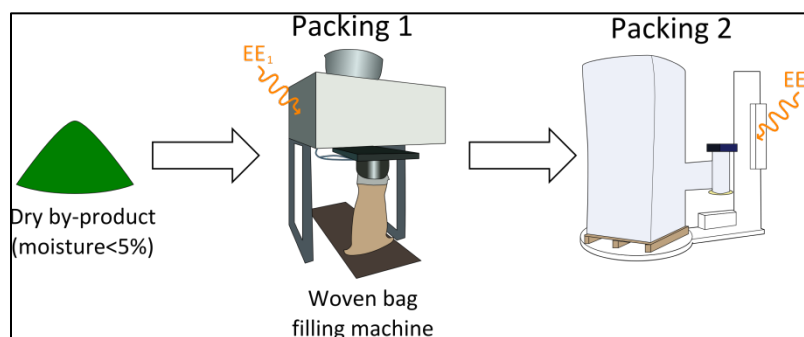


Figure A.18: Packing processing diagram and its involved technologies.

Table A.10: Energy, technical and economic characteristics associated to packing technologies.

Equipment	Energy consumption	Maximum unitary capacity	Approx. capital cost (US\$/unit)
Packing 1: Woven bag filling machine	2kW	300bags/h	24,000
Packing 2: Pallet machine	1.2kW	30pallets/h	3,500

Anaerobic Digestion (AD)

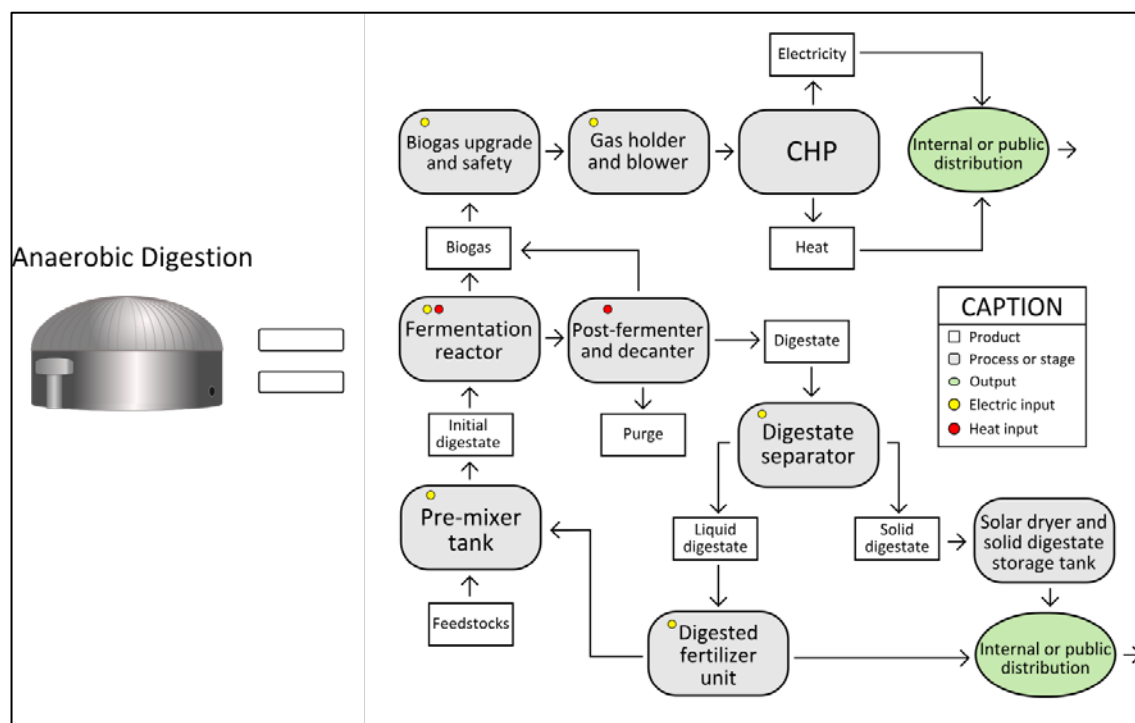
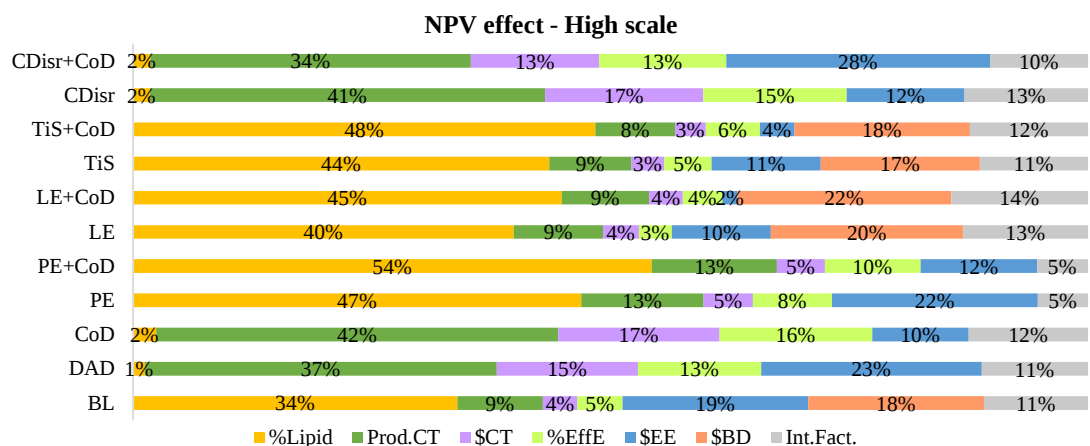
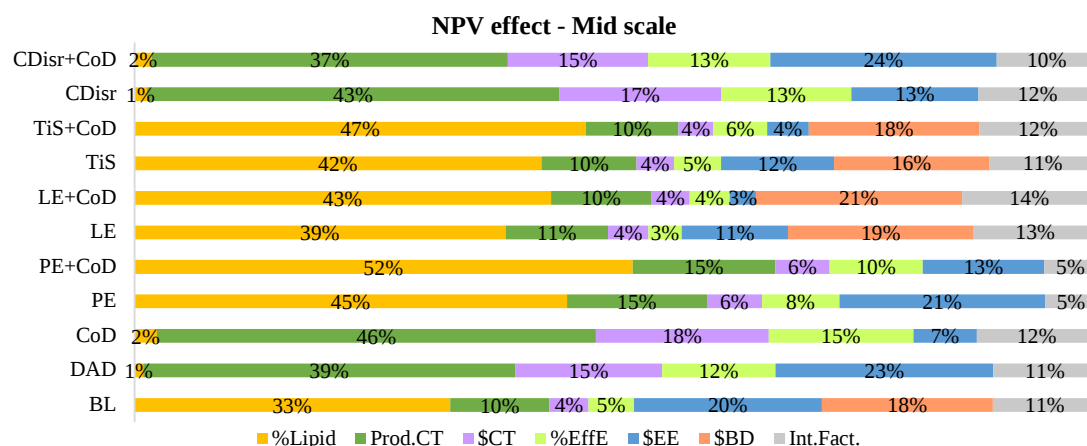
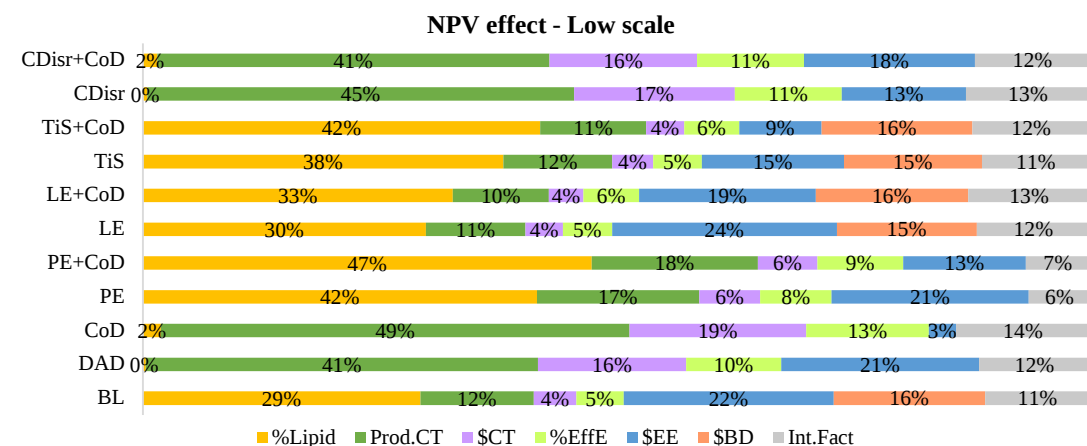


Figure A.19: Anaerobic digestion (AD) process diagram and its involved technologies.

Table A.11: Technical and economic characteristics associated to AD.

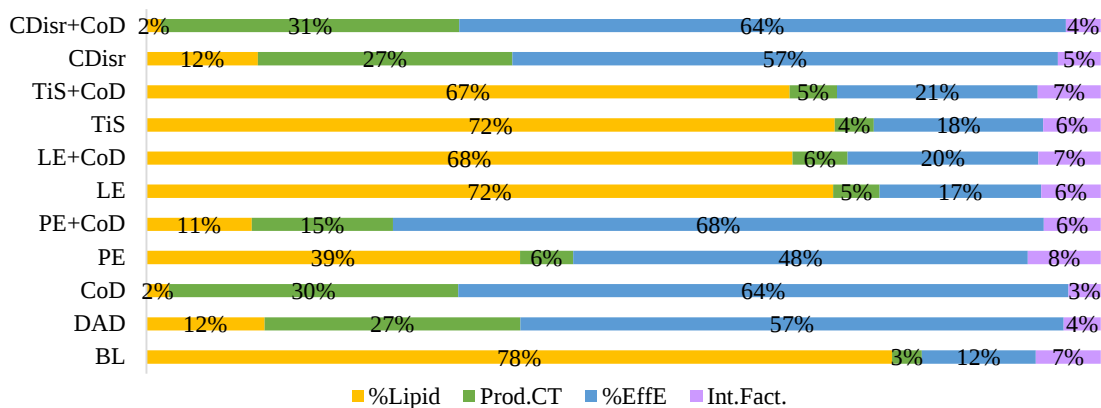
Equipment	Approx. unitary capital cost
Pre-mixer	US\$30-45/m ³
Digester system: fermenters	US\$35-50/m ³
Biogas system	US\$10-20/(m ³ /d) biogas
pH control system	US\$150-230/(m ³ /d) digestate
Digestate system	US\$400-550/(m ³ /d) digestate
Electric system and generation	US\$800-1,100/kW
Heating system	US\$270-370/kW

ANEXO B : PESO DE LOS FACTORES ESTANDARIZADOS SOBRE NPV DE *ISOCHRYSIS SP.*

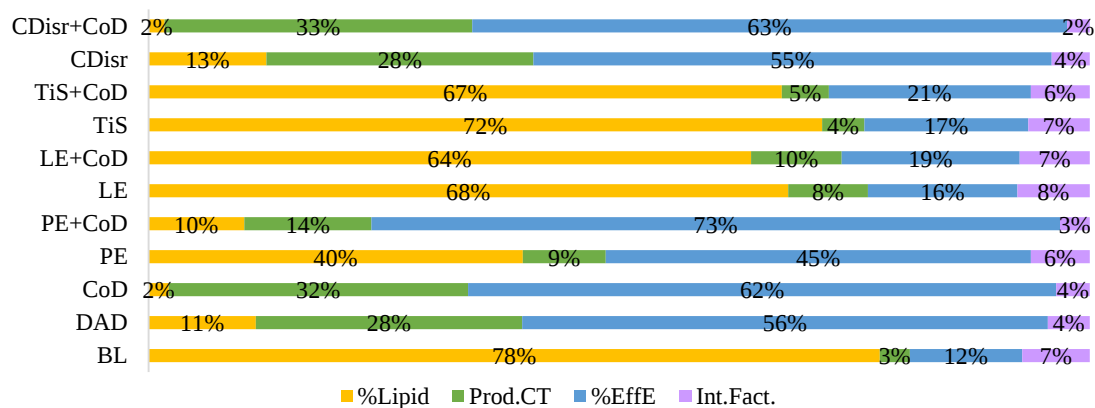


ANEXO C: PESO DE LOS FACTORES ESTANDARIZADOS SOBRE EROI DE *ISOCHRYSIS SP.*

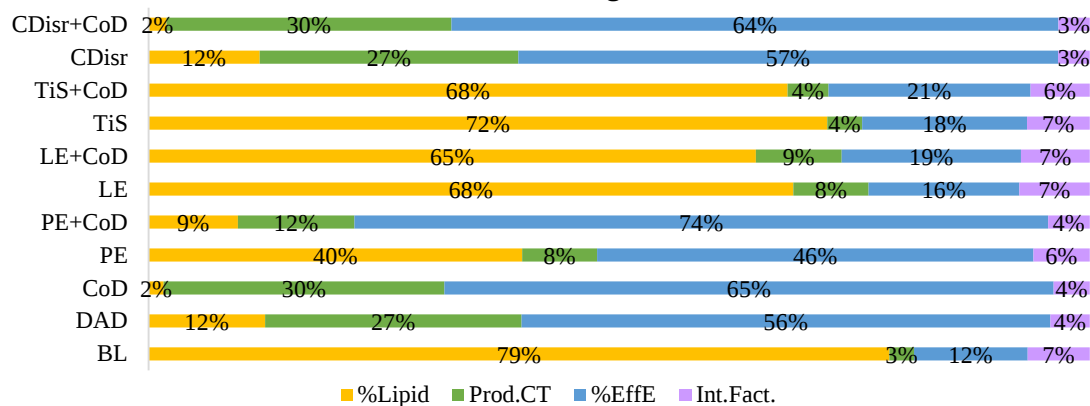
EROI effect - Low scale



EROI effect - Mid scale



EROI effect - High scale



ANEXO D: MAPA DE CHILE QUE GRAFICA LA SUPERPOSICIÓN DE LOS ELEMENTOS EMPLEADOS POR LA METODOLOGÍA DE SELECCIÓN DE SITIO DE CULTIVO DEL PRESENTE ESTUDIO

