

**APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA A LA PRODUCCIÓN DE  
BODIESEL PROVENIENTE DE MICROALGAS**

**YENIFFER PARDO CARDENAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUÍMICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUIÍMICA  
POSGRADO EN INGENIERIA QUIMICA  
BUCARAMANGA, COLOMBIA**

**2013**

**APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA A LA PRODUCCIÓN DE  
BODIESEL PROVENIENTE DE MICROALGAS**

**YENIFFER PARDO CARDENAS**

**Tesis de maestría para optar el título de Magister en Ingeniería Química**

**Director**

**Dr.Sc. VIATCHESLAV KAFAROV**

**Profesor Titular Universidad Industrial de Santander**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERIA FISICOQUÍMICA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA QUIÍMICA**

**POSGRADO EN INGENIERIA QUIMICA**

**BUCARAMANGA**

**2013**

## DEDICATORIA

*A Dios por darme fortaleza y ser la luz que me guía hoy y siempre.  
A todas las personas que contribuyeron a mi formación y me ayudaron a  
aprender nuevas cosas en cada etapa de mi vida.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo Agradecer a COLCIENCIAS por el apoyo a los proyectos de investigación en el tema de biocombustibles entre los cuales se encuentra el proyecto Desarrollo y validación del modelo de evaluación de producción con metodología del análisis de ciclo de vida (ACV) de la “cuna a la cuna” y por el programa de Jóvenes Investigadores.

Al Dr. Israel Herrera, por todos los espacios que me brindó para desarrollar dudas y debatir resultados durante el desarrollo de la investigación.

También quiero expresar mi gratitud a los evaluadores; Alexander Meneses y Paola Maradei por sus aportes para la versión final del libro.

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	21
1. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE.....	28
1.1 ANALISIS DE CICLO DE VIDA (ACV).....	28
1.1.1 Origen y evolución del análisis de ciclo de vida.....	28
1.1.2 Definición del análisis del ciclo de vida.....	29
1.1.3. Beneficios y aplicaciones de la herramienta del ACV.....	30
1.1.4 Metodología del Análisis del Ciclo de Vida.....	31
1.1.5. Herramientas informáticas de ACV . .....	33
1.1.6. Análisis de Ciclo de Vida de prospectiva tecnológica.....	34
1.2 ANÁLISIS DE PROCESOS.....	38
1.2.1 Diseño de procesos.....	40
1.3. CADENA PRODUCTIVA DE BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS.....	42
1.3.1 Las microalgas.....	43
1.3.2. Cultivo de microalgas. ....	48
1.3.3. Cosecha de microalgas.....	54
1.3.4 Secado de microalgas. ....	56
1.3.5. Extracción de aceite de microalgas.....	57
1.3.6 Esterificación - transesterificación del aceite para obtener biodiesel a partir de microalgas.....	59
1.4. ESTUDIOS PREVIOS DE ACV DE LOS BIOCOMBUSTIBLES DE MICROALGAS	61
2. DESARROLLO METODOLOGICO.....	65
2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	66
2.2. SELECCIÓN DE LA ESPECIE DE MICROALGA.....	66
2.3. IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS PARA CADA ETAPA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL.....	69

2.3.1. Selección de la tecnología de cultivo de microalgas. ....	70
2.3.2. Selección de la tecnología de cosecha de microalgas .....	71
2.3.3. Selección del sistema de secado de microalgas.....	74
2.3.4. Selección del proceso de extracción de aceite de microalgas.....	74
2.3.5. Selección del proceso de esterificación/transesterificación.....	75
2.4. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS A EVALUAR .....	76
2.5 APLICACIÓN DE ANALISIS DE PROCESOS .....	80
2.5.1. Descripción de la especie Chlorella sp .....	80
2.5.2. Tecnología de cultivo de microalgas .....	82
2.5.3. Tecnología de cosecha o recolección de biomasa de microalgas.....	87
2.5.4. Tecnología de secado de microalgas .....	94
2.5.5. Tecnología de extracción de aceite de microalgas.....	97
2.5.6. Tecnología de producción de biodiesel (esterificación – transesterificación).....	102
2.6 EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL. ....	108
2.6.1. Definición del objetivo y el alcance.....	108
2.6.2 Análisis de Inventario de los sistemas bajo estudio.....	116
2.6.3 Evaluación de impactos e interpretación de resultados. ....	132
3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS DEL ACV.....	134
3.1. RESULTADOS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA.....	134
3.1.1. Potencial de Calentamiento Global (PCG). ....	134
3.1.2. Categoría de Consumo de Energía Fósil. ....	146
3.1.3. Acidificación (ACD) .....	149
3.1.4. Eutrofización (EUT) .....	153
3.1.5. Formación de Ozono Troposférico (FOT) .....	157
3.1.6. Agotamiento de la capa de ozono estratosférico (ACO) .....	161
3.2. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS POTENCIALES DEL CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DE MICROALGAS .....	167
3.2.1. Evaluación de impactos potenciales del Ciclo de Vida de los escenarios de la fase 1 .....	168

3.2.2. Evaluación de impactos potenciales del Ciclo de Vida de los escenarios de la fase 2	180
4. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS O ÁREAS DE MEJORAS AL PROCESO DE BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS	193
4.1 PRIMERA APROXIMACIÓN A MEJORAS EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL	194
5. CONCLUSIONES	197
6. DIVULGACIÓN DE RESULTADOS (Publicaciones, eventos y tesis)	200
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	203
BIBLIOGRAFIA	221
ANEXOS	239

## LISTA DE FIGURA

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Esquema del ciclo de vida de un producto. ....	30
Figura 2. Aproximación conceptual del ACV .....	32
Figura 3. Esquema general del Análisis de Procesos [13]. ....	39
Figura 4. Esquema general del Ciclo de producción de Biodiesel a partir de microalgas. ....	44
Figura 5. Ilustración de la trayectoria de la luz y de los ciclos luz/oscuridad .....	49
Figura 6. Efecto de la intensidad de luz sobre el crecimiento fotoautotrófico de células fotosintéticas.....	50
Figura 7. Cultivo de Microalgas en el sistema de “raceway ponds” .....	51
Figura 8. Cultivo de microalga en un fotobiorreactor. (A. Tubular, B. Espiral.).....	53
Figura 9. Reacción general de transesterificación. R1, R2, R3 y R’ son radicales alquilo. Los catalizadores pueden ser álcalis, ácidos o enzimas (lipasas). [55, 56, 57]. ....	59
Figura 10. Metodología del plan de investigación .....	65
Figura 11. Esquemas de los límites de los sistemas considerados en la fase 1. ....	78
Figura 12. Esquemas de los límites de los sistemas considerados en la fase 2. ....	79
Figura 13. Imágenes de dos especies de <i>Chlorella</i> : a. <i>Chlorella vulgaris</i> . b. <i>Chlorella fusca</i> .....	81
.....	81
Figura 14. Diseño del estanque abierto para cultivo de microalgas [96]. ....	82
Figura 15. Flujos de entrada y salida del sistema de cultivo.....	84
Figura 16. Vista lateral del sistema de cosecha para floculación química hidráulica. ....	88
Figura 17. Vista lateral del sistema de cosecha para floculación química mecánica. ....	88
Figura 18. Sistema de adición del floculante. ....	88
Figura 19. Vista superior del tanque de floculador hidráulico. ....	91
Figura 20. Vista lateral del sistema de floculación microbiana-hidráulica.....	92
Figura 21. Sistema de secado de cinta. ....	96

Figura 22. Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite con hexano. ....	99
Figura 23. Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite con metanol- cloroformo. .....	101
Figura 24. Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite con Etanol-Hexano.	102
Figura 25. Diagrama de flujo del proceso de producción de biodiesel mediante las reacciones de esterificación/transesterificación. ....	107
Figura 26. Diagrama del proceso del cultivo de microalgas. ....	118
Figura 27. Diagrama de entradas y salidas del sistema de cultivo de microalgas (productividad $30 \text{ gm}^{-2}\text{d}^{-1}$ ).....	120
Figura 28. Diagrama del proceso de recolección de biomasa de microalgas. ....	121
Figura 29. Diagrama de bloque de entradas y salidas en el sistema de cosecha implementando el método de FQM. ....	122
Figura 30. Diagrama del proceso de secado de biomasa de microalgas. ....	123
Figura 31. Diagrama de bloque de entradas y salidas de la etapa de secado de biomasa de microalgas. ....	124
Figura 32. Diagrama del proceso de extracción de aceite de microalgas método con hexano (EH). ....	124
Figura 33. Diagrama de bloque de entradas y salidas del proceso de extracción de aceite de microalgas. ....	125
Figura 34. Diagrama del proceso del proceso de producción de biodiesel. ....	127
Figura 35. Diagrama de bloque de las entradas y salidas del proceso de producción de biodiesel. ....	128
Figura 36. Esquema del proceso de consumo de combustible. ....	128
Figura 37. Emisiones de Gases de efecto invernadero para la etapa de cultivo de microalgas para la producción de biodiesel.....	136
Figura 38. Porcentaje de emisiones del inventario de la etapa de cultivo de microalgas para la producción de biodiesel.....	136
Figura 39. Emisiones de GEI para los tres sistemas de recolección de biomasa de microalgas FQH, FQM y FMcH. ....	137
Figura 40. Emisiones de GEI para el proceso de secado de biomasa de microalgas. ..	139

Figura 41. Porcentaje de emisiones del inventario del proceso de secado de biomasa de microalgas. ....	140
Figura 42. Emisiones de GEI para los cuatro sistemas de extracción de aceite de microalgas analizados en este documento. ....	141
Figura 43. Emisiones de GEI para el proceso de esterificación – transesterificación de aceite para producir biodiesel de microalgas. ....	142
Figura 44. Consumo de energía en las etapas de producción de producción de biodiesel (contiene cada uno de los métodos de recolección de biomasa y de extracción de aceite estudiados). ....	148
Figura 45. Consumo de energía para las etapas: a. extracción de aceite de microalgas, b. Recolección de biomasa de microalgas. ....	148
Figura 46. Inventario de emisiones del proceso de cultivo de microalgas para la categoría de impacto de Acidificación. ....	151
Figura 47. Inventario de emisiones de la categoría de impacto de Acidificación para: a. procesos de recolección de biomasa. b. procesos de extracción de aceite de microalgas. . .....	151
Figura 48. Inventario de emisiones de la categoría de impacto de Acidificación para: a y b. Proceso de secado de biomasa de microalgas. c. Proceso de esterificación – transesterificación de aceite de microalgas. ....	152
Figura 49. Inventario de emisiones del proceso de cultivo de microalgas para la categoría de impacto de Eutrofización. ....	155
Figura 50. Inventario de emisiones de la categoría de impacto de Eutrofización para: a. procesos de recolección de biomasa. b. procesos de secado de biomasa de microalgas. ... .....	155
Figura 51. Inventario de emisiones de la categoría de impacto de Eutrofización para el proceso de secado de biomasa de microalgas. ....	156
Figura 52. Inventario de emisiones de la categoría de impacto de Eutrofización para: a. el proceso de extracción de aceite de microalgas, b. proceso de esterificación y transesterificación de aceite de microalgas. ....	156
Figura 53. Inventario de emisiones del proceso de cultivo de microalgas para la categoría de impacto de FOT. ....	159

Figura 54. Inventario de emisiones de la categoría de impacto FOT para: a. procesos de recolección de biomasa. b. procesos de secado de biomasa de microalgas.....	159
Figura 55. Inventario de emisiones de la categoría de impacto FOT para el proceso de secado de biomasa. ....	160
Figura 56. Inventario de emisiones de la categoría de impacto FOT para: a. proceso de extracción de aceite de microalgas, b. proceso de esterificación y transesterificación de aceite de microalgas. ....	160
Figura 57. Inventario de emisiones del proceso de cultivo de microalgas para la categoría de impacto de ACO .....	164
Figura 58. Inventario de emisiones de la categoría de impacto de ACO para: a. procesos de recolección de biomasa. b. procesos de secado de biomasa de microalgas. ....	165
Figura 59. Inventario de emisiones de la categoría de impacto de Eutrofización para: a. procesos de extracción de aceite. b. proceso de esterificación – transesterificación de aceite de microalgas. ....	166
Figura 60. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Contribución por etapas. ....	169
Figura 61. Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (g CO <sub>2</sub> -eq/ ton biodiesel) y ahorro de emisiones para los escenarios de la fase 1.....	170
Figura 62. Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (g CO <sub>2</sub> -eq/ ton biodiesel) y ahorro de emisiones para los escenarios estudiados en la fase 1 teniendo en cuenta el ciclo completo. ....	171
Figura 63. Contribución al consumo de energía fósil en MJeq/ton biodiesel .....	173
Figura 64. Porcentaje de contribución por etapas en el Agotamiento de la Capa de Ozono. ....	175
Figura 65. Porcentaje de contribución por etapas en la Formación de ozono troposférico. .	176
Figura 66. Porcentaje de contribución por etapas en la Acidificación. ....	178
Figura 67. Porcentaje de contribución por etapas a la Eutrofización. ....	179
Figura 68. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Contribución por etapas. ....	181
Figura 69. Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (g CO <sub>2</sub> -eq/ ton biodiesel) para los escenarios de la fase 2.....	182

Figura 70. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero (g CO <sub>2</sub> -eq/ton biodiesel) para los escenarios estudiados en la fase 2 teniendo en cuenta el ciclo completo. ....	183
Figura 71. Contribución al consumo de energía fósil en MJeq/ton de biodiesel.....	185
Figura 72. Porcentaje de contribución por etapas en el Agotamiento de la Capa de Ozono. ....	187
Figura 73. Porcentaje de contribución por etapas en la Formación de ozono troposférico. .	189
Figura 74. Porcentaje de contribución por etapas en la Acidificación. ....	190
Figura 75. Porcentaje de contribución por etapas a la Eutrofización. ....	192
Figura 76. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero (g CO <sub>2</sub> -eq/ton de biodiesel) usando gas natural como fuente de energía térmica y biomasa. ....	195
Figura 77. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero (g CO <sub>2</sub> -eq/ton de biodiesel) para los escenarios estudiados teniendo en cuenta el ciclo completo. ....	196
Figura 78. Contribución al consumo de energía fósil en MJ-eq/ton de biodiesel. ....	196

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Áreas de cultivo necesarias para remplazar el 15% del diésel consumido por el sector de transporte de USA por Biodiesel.....	43
Tabla 2. Contenido de lípidos de diferentes especies de microalgas. ....	45
Tabla 3. Requerimientos Principales de los Cultivos de Microalgas.....	49
Tabla 4. Comparación de las Propiedades de Biodiesel de Algas con los Valores Estándar ASTM para Biodiesel. ....	60
Tabla 5. Contenido de lípidos y productividad de las especies de microalgas promisorias para producción de biodiesel. ....	68
Tabla 6. Principales ventajas y limitaciones de los sistemas de cultivo de microalgas [72]..	71
Tabla 7. Principales ventajas y limitaciones de los métodos de cosecha.....	72
Tabla 8. Modelo de la especie de microalga <i>Chlorella sp.</i> (% en peso seco). ....	81
Tabla 9. Parámetros de diseño para un estanque de cultivo de algas. [96] .....	83
Tabla 10. Principales flujos de masa y energía para el sistema de cultivo de microalgas.	86
Tabla 11. Parámetros de diseño de los sistemas de FQH y FQM.....	89
Tabla 12. Parámetros de diseño de los sistemas de FMcH.....	92
Tabla 13. Flujos de masa y energía para los sistemas de cosecha de microalgas. ....	94
Tabla 14. Flujos de masa y energía para el sistema de secado de microalgas. ....	97
Tabla 15. Flujos de masa y energía de los sistemas de extracción de aceite estudiados....	103
Tabla 16. Flujos de masa y energía del proceso de esterificación-transesterificación de aceite de microalgas.....	106
Tabla 17. Categorías de Impacto para el método EPD 2007.....	112
Tabla 18. Poder calorífico inferior para las macromoléculas [61].....	131

Tabla 19. Porcentajes de asignación en base al contenido energético de los co-productos obtenidos en el proceso de biodiesel para cada uno de los escenarios estudiados.....	132
Tabla 20. Potenciales de calentamiento global (horizonte temporal de 100 años).....	135
Tabla 21. Inventario de las emisiones de GEI para el método de FMcH para producir 1 ton de biodiesel. (kg/ton biodiesel).....	138
Tabla 22. Inventario de las emisiones de GEI para el método de FQM para producir 1 ton de biodiesel. (kg/ton biodiesel).....	138
Tabla 23. Inventario de las emisiones de GEI para el método de FQH para producir 1 ton de biodiesel. (kg/ton biodiesel).....	138
Tabla 24. Inventario de las emisiones de GEI para el método de EEH. (kg/ton biodiesel). ..	144
Tabla 25. Inventario de las emisiones de GEI para el método de EMC. (kg/ton biodiesel). .	144
Tabla 26. Inventario de las emisiones de GEI para el método de EH. (kg/ton biodiesel). ....	144
Tabla 27. Inventario de las emisiones de GEI para el método de HE 33:1. (kg/ton biodiesel).....	145
Tabla 28. Consumo energético de cada una de las etapas analizadas en la cadena de producción de biodiesel (MJ energía fósil/ton biodiesel). .....	147
Tabla 29. Emisiones de gases de efecto invernadero del tubo de escape del vehículo de referencia en el biodiesel estudiado (g/ton biodiesel). .....	171
Tabla 30. Emisiones de GEI (C2G) de los tres escenarios y porcentaje de ahorro de emisiones. ....	172
Tabla 31. Contribución del ciclo de vida de los escenarios de la fase 1 al consumo de energía fósil (MJeq/ton biodiesel).....	173
Tabla 32. Contribución de los escenarios de la fase 1 al consumo de energía fósil (MJ- eq/ton biodiesel) y el ratio de energía fósil. ....	174
Tabla 33. Agotamiento de la capa de ozono (kg FC11eq/ton de biodiesel).....	175
Tabla 34. Formación del Ozono Troposférico (kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /ton de biodiesel).....	176
Tabla 35. Formación del Ozono Troposférico (kg SO <sub>2</sub> eq /ton biodiesel).....	177
Tabla 36. Formación del Ozono Troposférico (kg PO <sub>4</sub> eq/ton biodiesel).....	178

Tabla 37. Emisiones de GEI (C2G) de los escenarios 2, 4, 5 y 6 y porcentaje de ahorro de emisiones. ....	184
Tabla 38. Contribución del ciclo de vida de los escenarios de la fase 2 al consumo de energía fósil (MJ-eq/ton de biodiesel). ....	186
Tabla 39. Contribución de los escenarios de la fase 2 al consumo de energía fósil (MJeq/ton de biodiesel) y el ratio de energía fósil. ....	186
Tabla 40. Agotamiento de la capa de ozono (kg FC11eq/ton biodiesel). ....	187
Tabla 41. Formación del Ozono Troposférico (kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /ton de biodiesel).....	188
Tabla 42. Formación del Ozono Troposférico (kg SO <sub>2</sub> eq /ton de biodiesel). ....	189
Tabla 43. Formación del Ozono Troposférico (kg PO <sub>4</sub> eq/ton de biodiesel). ....	191

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
ANEXO A. Rueda de paletas (paddlewheel) en sistema de cultivo abierto.....	239
ANEXO B. Normativas de la Unión Europea y Estándares Americanos para el biodiesel producido .....	240
ANEXO C. Escenario creado en SimaPro de producción de energía térmica en Colombia .....	241
ANEXO D. Escenario creado en SimaPro de producción de energía eléctrica en Colombia. ....	242
ANEXO E. Red de Ciclo de Vida para el escenario 1 tomado directamente desde SimaPro para la categoría PCG (Global warming (GWP100) (kg CO2 eq)).....	243
ANEXO F. Red de Ciclo de Vida para el escenario 2 tomado directamente desde SimaPro para la categoría PCG (Global warming (GWP100) (kg CO2 eq)).....	244
ANEXO G. Red de Ciclo de Vida para el escenario 3 tomado directamente desde SimaPro para la categoría PCG (Global warming (GWP100) (kg CO2 eq)).....	245
ANEXO H. Red de Ciclo de Vida para el escenario 4 tomado directamente desde SimaPro para la categoría PCG (Global warming (GWP100) (kg CO2 eq)).....	246
ANEXO I. Red de Ciclo de Vida para el escenario 5 tomado directamente desde SimaPro para la categoría PCG (Global warming (GWP100) (kg CO2 eq)).....	247
ANEXO J. Red de Ciclo de Vida para el escenario 6 tomado directamente desde SimaPro para la categoría PCG (Global warming (GWP100) (kg CO2 eq)).....	248
ANEXO K. Escenario creado en SimaPro de producción de calor a partir de biomasa.	249
ANEXO L. Principales corrientes del proceso de extracción de aceite EH.....	250
ANEXO M. Principales corrientes del proceso de extracción de aceite EEH.....	251
ANEXO N. Principales corrientes del proceso de extracción de aceite EMC. ....	252

## RESUMEN

**TITULO:** APLICACIÓN DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA A LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL PROVENIENTE DE MICROALGAS\*

**AUTOR:** YENIFFER PARDO CARDENAS\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Microalgas, ACV-prospectiva tecnológica, biodiesel, extracción de aceite.

**DESCRIPCION:** En la presente tesis se aplica la metodología de Análisis de Ciclo de vida (ACV) para evaluar y cuantificar los impactos ambientales potenciales del proceso de producción de biodiesel a partir de microalgas en Colombia –bajo el enfoque del análisis de prospectiva tecnológica-, con el fin de generar información para la toma de decisiones sobre la aplicación de este proceso en desarrollo a una escala mayor. Un estudio comparativo de seis escenarios se ha llevado a cabo para evaluar los impactos ambientales, que comprenden las etapas desde el cultivo hasta su distribución y uso. Para ello, se desarrolló un análisis de inventario (balances de masa y energía) en cada una de las etapas, donde en la etapa de extracción de aceite y producción de biodiesel fue necesario desarrollar los modelos con el uso del software Aspen Plus 7.1, lo que permitió encontrar una aproximación adecuada del proceso a nivel industrial.

Los resultados confirman el potencial de las microalgas como un sumidero de gases de efecto invernadero, y pone en evidencia la necesidad crucial de la reducción del consumo energético. Por otra parte, establece que es necesario hacer algunas mejoras técnicas en la etapa de extracción de aceite para aumentar la eficiencia en los resultados relacionados con los gases de efecto invernadero (GEI), que se compararon con los criterios de sostenibilidad de Europa, con el fin de identificar la reducción del proceso de producción de biodiesel de microalgas hipotético. El escenario 4 presenta la reducción más importante tomando el ciclo completo, cerca de un 62%, respecto a la referencia fósil.

---

\* Trabajo de grado de Maestría.

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, Maestría en Ingeniería Química, Director: Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov.

## ABSTRACT

**TITLE: APPLICATION OF LIFE CYCLE ANALYSIS TO THE BIODIESEL PRODUCTION FROM MICROALGAE\***

**AUTHOR: YENIFFER PARDO CARDENAS\*\***

**KEY WORDS:** Microalgae, LCA-technology prospective, biodiesel, oil extraction.

**DESCRIPTION:** The following study applies the methodology of Life Cycle Analysis to evaluate and quantify the potential environmental impacts of the process of biodiesel production from microalgae in Colombia, (under the focus of technological prospective analysis) with the purpose to generate information allowing the decision making regarding the application of the process being developed to a major scale. A comparative study of six stages has been taken into account to evaluate the environmental impacts which consist of the phase from cultivation to distribution and use. For this, an inventory analysis (mass and energy balances) was developed in each one of the phases. As for the oil extraction and biodiesel production phase, it was necessary to develop a model using Aspen Plus 7.1 allowing an acceptable approximation acquisition of the process at an industrial level.

The results confirm the potential of microalgae as a dioxide sink of greenhouse gases which shows evidence of the crucial necessity of the energy consumption reduction. Moreover, it establishes how necessary it is to implement some technical improvements at the oil extraction phase to increase the efficiency of the results with relation to the greenhouse gases (GHG) which were compared with the European criteria of sustainability with the purpose to identify the reduction of the production process of hypothetical microalgae biodiesel. The 4th stage presents the most important reduction taking the complete cycle (close to a 62%) respect to the reference fossil.

---

\* Master thesis.

\*\* Faculty of Physicochemical Engineering, School of Chemical Engineering. Master in Chemical Engineering. Director Dr. Sc. Viatcheslav Kafarov

## INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles fósiles podría ser una de las variables que contribuyen de manera importante con el calentamiento global, por tanto energía limpia y renovable se requiere para la sustitución de combustibles fósiles con el fin de reducir las emisiones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) [1,2], entre ellos el CO<sub>2</sub>. Consecuentemente, para resolver problemas ambientales, se ha intensificado la búsqueda de alternativas para la generación de energía renovables, que sean capaces de estar asociadas a la protección ambiental.

En este sentido, la biomasa es una fuente promisoría debido a que es renovable y neutra en el balance de CO<sub>2</sub>; además, los combustibles derivados de biomasa queman más limpio que los combustibles fósiles [3,4]. Se ha estimado que la biomasa podría producir de manera sustentable cerca del 25% de los requerimientos energéticos. Las fuentes primarias de conversión de biomasa en combustibles líquidos incluyen a la gasificación termoquímica para producir gas de síntesis, la licuación/pirólisis hacia bio-aceites, la conversión de azúcares hacia etanol e hidrocarburos aromáticos y la esterificación de triglicéridos para formar biodiesel. En particular, la biomasa y los residuos de biomasa son fuentes promisorias para la producción sustentable de biocombustibles.

La biomasa de microalgas ha despertado un gran interés científico como fuente de energía alternativa, ya que es un recurso renovable que además fija CO<sub>2</sub> de la atmósfera mediante la fotosíntesis. Si se produce biomasa de manera sostenida, su combustión no tiene ningún impacto en el balance de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, debido a que el CO<sub>2</sub> emitido por la quema de biocombustible se ve compensado por el CO<sub>2</sub> fijado por la fotosíntesis [5, 6]. Así mismo, es bien sabido que las microalgas pueden asimilar CO<sub>2</sub> como fuente de carbono para su crecimiento [7].

Ya desde 1978, Estados Unidos está desarrollando un programa conocido como “Aquatic Species Program” que tiene como objetivo principal la producción de biodiesel a partir de microalgas creciendo en campo abierto, utilizando el anhídrido carbónico de plantas termoeléctricas como suministro de carbono. El programa obtuvo avances en la ciencia de la manipulación del metabolismo y de los sistemas de producción de microalgas [8].

Sin embargo, a pesar del fuerte interés de los sectores económicos y científicos, hasta ahora, no existen las factibilidades industriales que produzcan biodiesel a partir de microalgas. Los estudios realizados sobre el tema se han limitado a pruebas a escala de laboratorio y plantas piloto<sup>1</sup>. La biomasa de microalgas es la más promisoría alternativa sostenible a los combustibles de transporte tradicionales.

Colombia presenta grandes ventajas en el tema de biocombustibles, cuenta con una rica biodiversidad, variedad de climas y con un número de horas de sol más elevado gracias a su ubicación geográfica, que, resultan particularmente atractivos para producción de biocombustibles a partir de microalgas. Además dicha biodiversidad permitiría la búsqueda de microalgas con mayor cantidad de lípidos, que brinden un mayor rendimiento en producción de biodiesel, asimismo, facilidad en el proceso de cultivo y adaptabilidad a las variaciones climáticas.

Las materias primas utilizadas habitualmente en la producción de biodiesel y bioetanol provienen principalmente de plantas oleaginosas como maíz, girasol, soja, coco, palma, colza o canola; de grasas animales, aceites de fritura [9]. Estos se producen a escala industrial y son la sustitución del petróleo para los motores de combustión interna. La mayor crítica a menudo dirigida contra la fabricación de estos biocombustibles, especialmente contra la producción a gran escala de estos,

---

<sup>1</sup>Laurent Lardon, Arnaud Helias., et al. Life-Cycle Assessment of Biodiesel from Microalgae. Laboratoire de Biotechnologie de l'Environnement, 11100 Narbonne, France, Montpellier SupAgro, 2009.

es que no puede dar respuesta a la demanda global de combustible con sustentabilidad ambiental y económica. Las tierras aptas para siembra son limitadas, las cosechas están sujetas a variables climáticas y no es razonable, ante el incremento de la población mundial, utilizar alimentos en la producción de combustibles o tierras aptas para sembrar materias primas alternativas.

Últimamente, inspirados por el modelo de desarrollo sostenible que tiene impulsores en todo el mundo, se han realizado instrumentos analíticos y de gestión no solo orientados al campo energético sino también orientados a incluir la variable ambiental y los flujos desde y hacia la naturaleza en los balances, con el nombre y categoría de impacto ambiental, en los criterios sobre proyectos e inversiones y en la toma de decisiones sobre inversiones y producción.

Los análisis de ciclo de vida, también se utilizan como una herramienta de medición en el diseño de procesos ecológicos [10]. Cálculos de ACV tienen como objetivo modelar el ciclo de vida completo de un producto (ya sea de la "cuna a la tumba" o de "la cuna a la cuna") y medir las maneras en las que tendrán un impacto sobre el medio ambiente a lo largo de la cadena de producción. Como tal, el ACV no es una herramienta de diseño, pero mide los impactos ambientales.

En la actualidad, la incorporación de la gestión ambiental en los proyectos de desarrollo, productos procesos y servicios, vinculan los análisis de prospectiva tecnológica considerada, esta como una disciplina que tiene por objeto incorporar la dimensión ambiental en los procesos, productos y servicios que demanda el desarrollo tecnológico y científico-técnico en la esfera internacional. Un análisis de prospectiva tecnológica parte de la identificación del tipo de tecnología que se desea analizar, que habitualmente se engloba en una de las tres categorías siguientes<sup>2</sup>:

---

2. Aragón A. Salvador. Prospectiva tecnológica. Artículo publicado en ABC. 2011

Tecnologías claves: son aquellas que tienen un mayor impacto sobre la rentabilidad de los productos o la mejora de la productividad. Su difusión es limitada y su posesión va a condicionar fuertemente la posición competitiva de la empresa.

Tecnologías de base: son tecnologías ampliamente disponibles por las empresas de un mismo sector y suele ser común a todos los productos de una actividad concreta.

Tecnologías emergentes: son aquellas que en una primera fase de su aplicación en la empresa muestran un notable potencial de desarrollo. El nivel de incertidumbre que rodea a estas tecnologías es particularmente elevado.

Esta clasificación está estrechamente relacionada con el concepto de ciclo de vida de la tecnología, donde se distinguen tres etapas: nacimiento, crecimiento y madurez. El nacimiento se asocia a tecnologías emergentes, el crecimiento a tecnologías claves y, finalmente, la madurez y el declive a tecnologías de base.

La atención creciente al análisis de ciclo de vida de las tecnologías, como herramienta de gestión ambiental permite que su utilización en la evaluación del consumo de energía, materias primas y emisiones de productos, proceso o servicios, durante todo su ciclo de vida, durante la extracción de materia prima, la fabricación (incluyendo el empleo de los recursos naturales necesarios), la distribución, utilización y eliminación final.

## **HIPÓTESIS**

Aplicando la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en la evaluación ambiental de la tecnología en desarrollo de producción de biodiesel de microalgas -bajo un análisis de prospectiva tecnológica-, es posible realizar la evaluación y

cuantificación de los impactos ambientales de mayor interés, de manera que la toma de decisiones sobre la implementación de esta tecnología en Colombia, esté soportada en un adecuado soporte científico.

## **OBJETIVOS**

El objetivo general de esta investigación es:

Aplicar la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) en la evaluación del impacto ambiental potencial del proceso de producción de biodiesel a partir de microalgas –bajo el enfoque del análisis de prospectiva tecnológica-, para evaluar y cuantificar aquellos impactos ambientales de mayor relevancia, con la ayuda de software especializados (ASPEN PLUS® 7.1 y SimaPro 7.1).

Los objetivos específicos trazados para alcanzar el objetivo general son:

- Seleccionar una especie de microalga teniendo en cuenta las condiciones ambientales del cultivo, producción de lípidos y disponibilidad de información composicional, como materia prima para la obtención de biodiesel.
- Aplicar la metodología de análisis de procesos (utilizando el software Aspen Plus®7.1) con el fin de definir los balances de materia y energía para cada una de las etapas (cultivo, cosecha, secado, extracción, transesterificación, distribución y uso) que conforman el ciclo completo de producción de biodiesel a partir de microalgas.
- Aplicar la metodología de Análisis de Ciclo de Vida a la producción de biodiesel a partir de microalgas con el fin de cuantificar los impactos ambientales de todas las etapas del proceso haciendo uso del software Simapro7.1.

- Plantear posibles mejoras que contribuyan a la reducción del impacto ambiental del proceso de producción de biodiesel.

Con lo anterior, la tesis se ha dividido en cuatro capítulos:

El primer capítulo se ocupa del marco teórico del desarrollo de la Metodología de Análisis de Ciclo de Vida y Análisis de Procesos; luego se presenta un estado del arte de los principales aspectos de la cadena productiva de biodiesel a partir de microalgas y finalmente se muestra unos estudios previos de análisis de Ciclo de Vida de los biocombustibles de microalgas.

El segundo capítulo está dedicado al desarrollo metodológico de la investigación, donde se llevan a cabo una serie de siete pasos, dentro de los cuales se realiza la selección de la especie de microalgas, selección de las tecnologías para cada etapa del proceso, definición de escenarios a evaluar y por último se desarrolla la aplicación de análisis de procesos y Análisis de Ciclo de Vida (ACV) al proceso de producción de biodiesel, donde se desarrolla un análisis de inventario (balances de masa y energía) en cada una de las etapas, en algunas fue necesario desarrollar los modelos que representan estas etapas, soportado con el uso del software Aspen Plus 7.1, lo que permitió encontrar una aproximación adecuada del proceso a nivel industrial y en otras se usó tecnologías base ya implementadas en la actualidad.

En el tercer capítulo, se muestra los diferentes resultados y análisis de resultados de los escenarios hipotéticos donde se evaluó las emisiones de inventario y los impactos ambientales potenciales de cada uno de los procesos mediante el uso de la herramienta SimaPro 7.1. Cada sistema de producción de biodiesel a partir de microalgas comprende las etapas de cultivo, cosecha, secado, extracción de aceite, esterificación-transesterificación de aceite hasta su transporte-distribución y uso.

El cuarto capítulo se describe algunas áreas de mejoras propuestas al proceso de producción de biodiesel a partir de microalgas que ayudan a reducir el impacto ambiental.

## 1. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE

### 1.1 ANALISIS DE CICLO DE VIDA (ACV).

Un Análisis de Ciclo de Vida es un método para estimar el impacto ambiental de un producto durante toda su vida, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final o su reutilización.

**1.1.1 Origen y evolución del análisis de ciclo de vida.** Esta metodología tiene sus orígenes en la década del sesenta, cuando fue evidente que el único modo eficaz de analizar el tema de “la energía” en los sistemas industriales desde el punto de vista ambiental, era el de examinar todos los procesos seguidos por la materia prima, desde su extracción, transformación y uso, terminando con el retorno a la ecosfera en forma de residuos, pero recién en la década de los 90 se desarrolló y puso en práctica rápidamente. Entre las más valiosas contribuciones se puede mencionar el código de prácticas para ACV (LCA por sus siglas en inglés) publicado por la SETAC<sup>3</sup> en 1993, la Guía Nórdica para LCA en 1995 (Publicada por el Nordic Council of Ministers) y se llega a 1997 con el proceso de estandarización del procedimiento y el método de LCA elaborado por ISO (International Organization for Standardization).

Cualquier producto, servicio o actividad tiene un impacto sobre el medio ambiente. La idea de la Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es inventariar y evaluar dichos impactos lo cual da como resultado un informe utilizado para tomar decisiones. Una ventaja clara de la metodología es que permite detectar situaciones en las que un determinado sistema parece “más limpio” que otro simplemente porque transfiere las cargas ambientales a otros procesos o región geográfica, sin un mejoramiento real desde el punto de vista global.

---

<sup>3</sup> SETAC: Society of Environmental Toxicology and Chemistry.

**1.1.2 Definición del análisis del ciclo de vida.** La herramienta de gestión ambiental más comúnmente conocida para evaluar el balance de energía y de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el caso de los biocombustibles se conoce como Análisis de Ciclo de Vida. El concepto de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) de productos, es también conocido como Evaluación del Ciclo de Vida (ECV) o más comúnmente en la bibliografía internacional como Life Cycle Assessment (LCA).

En el caso de los biocombustibles, el Análisis de Ciclo de Vida evalúa todas las entradas y salidas de materiales y cuantifica la energía y los Gases Efecto Invernadero, desde la colocación de la semilla hasta su utilización final en el vehículo (figura 1). Es decir, se considera desde la energía necesaria para mover la maquinaria agrícola a lo largo del proceso de cultivo, incluyendo el transporte de la materia prima hasta la planta de producción del biocombustible, su distribución y finalmente el uso en el vehículo. En cada una de esas etapas se hace la valoración de entradas de energía y emisión de gases.

La familia de Normas ISO 14000 contempla el ACV en su serie 14040 y 14044<sup>4</sup>; la ISO 14040 elabora un tipo de norma (estableciendo un procedimiento común a todos) que sirva para evaluar los impactos medioambientales a lo largo de toda la vida de un producto.

El ECV/LCA no es el único método que se puede aplicar a los temas medioambientales. El concepto de ECV es bastante nuevo; el Comité Técnico 207 sigue dedicándose a estudiar este tema.

---

<sup>4</sup>ISO (2006a) ISO 14040: environmental management-life cycle assessment-principles and framework. ISO Geneva

ISO (2006b) ISO 14044: environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines. ISO Geneva

**Figura 1. Esquema del ciclo de vida de un producto.**



Adaptado de: U.S. Department of Energy

Todas las actividades o procesos provocan impactos medioambientales, suponen consumo de recursos, emiten sustancias al medio ambiente y generan otras modificaciones ambientales durante su periodo vital. Los impactos medioambientales que se valoran habitualmente incluyen el cambio climático, la reducción de la capa de ozono, la generación de ozono en la troposfera, eutrofización, acidificación entre otras.

En distintos países se han desarrollado estudios de análisis de ciclo de vida dirigidos a biocombustibles entre los que se destacan: Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus por sheehan J. et al. (1998); el Análisis de Ciclo de vida comparativo de Biodiesel y Diesel llevado a cabo por CIEMAT (2006) y el Análisis de Ciclo de vida de productos energéticos desarrollados por Rainer Zah, et al. (2007); entre otros.

**1.1.3. Beneficios y aplicaciones de la herramienta del ACV.** El ACV es una herramienta que va más allá de la decisión netamente ambiental ya que abarca todas las entradas y salidas, directas e indirectas, lo que le permite manejar todos los factores ambientales. Además, la metodología utilizada es cuantitativa, con lo que la toma de decisiones puede ampliarse, antes de tomar una decisión, ya que los resultados entregados son objetivos. También compatibiliza la preocupación

por el medio ambiente y los beneficios económicos en el análisis y gestión de la contabilidad tradicional, entregando una nueva herramienta de gestión a las empresas.

El ACV se puede utilizar para conseguir los siguientes objetivos:

- Dar una perspectiva lo más completa posible de las interacciones de una actividad con el medioambiente.
- Identificar los impactos medioambientales más importantes y las etapas o 'puntos calientes' del ciclo de vida que contribuyen a esos impactos.
- Comparar impactos medioambientales de productos, procesos o actividades alternativas.
- Tomar decisiones de mercado con información de los efectos ambientales de esas actividades e identificar oportunidades para las mejoras ambientales.

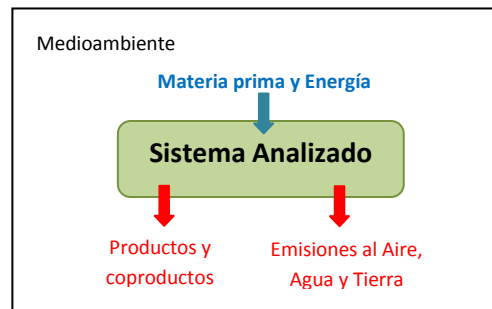
**1.1.4 Metodología del Análisis del Ciclo de Vida.** La metodología de Análisis del Ciclo de Vida puede definirse como “Un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad mediante la identificación y cuantificación de la energía y los materiales usados y los residuos descargados al medioambiente; evaluar su impacto e identificar y evaluar oportunidades para efectuar mejoras medioambientales. Esta evaluación incluye todo el ciclo de vida del producto, proceso o actividad, incluyendo la extracción y procesado de las materias primas, el manufacturado, el transporte y la distribución, el uso, reuso y mantenimiento, el reciclaje y el vertido final” [11]. Las etapas principales que componen este análisis son las siguientes:

**1.1.4.1 Definición y alcance de los objetivos:** Esta etapa del proceso/servicio/actividad se inicia definiendo los objetivos globales del estudio, donde se establecen la finalidad del estudio, el producto implicado, la audiencia a

la que se dirige, el alcance o magnitud del estudio (límites del sistema), la unidad funcional, los datos necesarios y el tipo de revisión crítica que se debe realizar. Por otro lado se debe mirar el tipo de enfoque del ACV sea atribucional o consecuencial. El ACV con enfoque atribucional describe el comportamiento ambiental de un producto a lo largo de su ciclo de vida y el ACV con enfoque consecuencial describen los efectos que pueden provocar cambios en el ciclo de vida del producto.

**1.1.4.2. Análisis del inventario:** El ACV de un producto es una serie de procesos y sistemas conectados por su finalidad común de creación del producto. El análisis del inventario es una lista cuantificada de todos los flujos entrantes y salientes del sistema durante toda su vida útil, los cuales son extraídos del ambiente natural o bien emitidos en él, calculando los requerimientos energéticos y materiales del sistema y la eficiencia energética de sus componentes, así como las emisiones producidas en cada uno de los procesos y sistemas (ver figura 2).

**Figura 2. Aproximación conceptual del ACV**



**1.1.4.3. Evaluación de los impactos del ciclo de vida.** Esta fase consiste en interpretar el inventario, analizando y evaluando los impactos producidos por las cargas ambientales. La evaluación de impacto consta de una serie de etapas:

- Clasificación: cada carga ambiental se une a una o varias categorías de impacto relacionando así las cargas ambientales con los efectos que producen.

- **Caracterización:** la contribución de cada carga ambiental a cada una de las categorías de impacto se calcula multiplicando las cargas por unos factores de caracterización. Los resultados dentro de cada una de las categorías de impacto se suman para dar un resultado de cada categoría.
- **Normalización.** Cada resultado de cada categoría se normaliza para obtener una estimación de la importancia del resultado en las diferentes categorías.
- **Valoración.** El resultado normalizado se multiplica por un factor de ponderación que representa la importancia relativa de cada categoría de impacto. Los resultados ponderados se pueden entonces sumar para dar un resultado final del impacto ambiental del sistema estudiado.

**1.1.4.4 La interpretación de resultados:** En esta fase se identifican y evalúan las oportunidades de reducir los impactos ambientales.

El método del ACV es de carácter dinámico, y las cuatro etapas en las que se realiza están relacionadas entre ellas; por lo que a medida que se obtienen resultados, se pueden modificar o mejorar los datos, las hipótesis, los límites del sistema o los objetivos, lo cual exige el recálculo. Este hecho, más la gran cantidad de datos históricos que se deben poseer para realizar un ACV, demuestra la necesidad de contar con un instrumento informático.

**1.1.5. Herramientas informáticas de ACV.** Existen varias bases de datos y software para la conducción de un ACV. Los más reconocidos mundialmente son la base de datos para la generación del inventario de Ecoinvent, el software SimaPro y el software GaBi. Ecoinvent es una base de datos del Swiss Center for Life Cycle Inventories que contiene datos de inventario de procesos industriales a nivel internacional para el suministro energético, la extracción de recursos, el suministro de materiales, químicos, metales, procesos agrícolas, gestión de residuos, servicios y transporte. Dicha base de datos está incluida en el software SimaPro, desarrollado por PRé (Product Ecology Consultants) que permite diseñar

e implementar las fases del ACV de una manera estructurada, de igual manera analiza y compara los aspectos medioambientales de un producto o proceso de una manera sistemática y consistente cumpliendo las recomendaciones de la norma ISO 14040 y 14044.

El ACV se ha convertido actualmente en una herramienta fundamental para el desarrollo de políticas de aprovisionamiento energético y para evaluar parcialmente la sustentabilidad de los biocombustibles para transporte. El ACV como herramienta de análisis de impactos es promovido fundamentalmente por la Unión Europea y Estados Unidos, y se analiza particularmente el potencial de reducción de emisiones de GEI y el consumo de energía primaria no renovable. Principalmente, se evalúan estos impactos por su correspondencia con los objetivos políticos de dependencia energética (de combustibles fósiles) y de compromisos asumidos en el Protocolo de Kyoto por parte de los países desarrollados.

**1.1.6. Análisis de Ciclo de Vida de prospectiva tecnológica.** La incorporación de la gestión ambiental en los proyectos de desarrollo, productos tangibles, procesos y servicios, se vincula a la prospección tecnológica considerada como una disciplina que tiene como objeto incorporar la dimensión ambiental en los procesos, productos y servicios que demanda el desarrollo tecnológico y científico - técnico en la esfera internacional.

Estos instrumentos de gestión tienen como propósito el análisis de las condiciones y las posibilidades de realización de tendencias, continuidades y rupturas, en un horizonte de tiempo fijo, en temas específicos como la ciencia, la tecnología, y el medio ambiente.

Otra definición conocida la plantea la Agenda 21, aprobada en la Cumbre de Rio de 1992, donde se establece el concepto de Tecnología Ecológicamente Racional, se define como: aquella tecnología que, encaminada a lograr la producción de un bien o servicio, que redunde en un proceso menos contaminante, que utiliza todos los recursos en forma más sostenible, recicla una mayor porción de sus desechos y productos y trata los desechos residuales en forma más aceptable que la tecnología que ha venido a sustituir.

**1.1.6.1. Prospectiva tecnológica:** La prospectiva tecnológica engloba un conjunto de técnicas orientadas a definir la relevancia de una tecnología dada en un momento futuro y dentro de un contexto dado, que puede ser un país, un sector o una empresa. En un entorno empresarial esta relevancia queda traducida en la definición de las tecnologías aplicadas en los procesos y en los contenidos tecnológicos de los productos o servicios.

La finalidad de la prospectiva tecnológica es la de una ayuda para la toma de decisiones donde la tecnología constituye un factor cada vez más determinante, y en el que el propio ritmo de cambio tecnológico, cada día más acelerado, incorpora un grado creciente de incertidumbre.

Estas técnicas pueden apoyar tanto a decisiones estratégicas como tácticas dentro una organización. Un ejemplo de las primeras se encuentra en la planificación de actividades de I+D, que van a condicionar fuertemente el desarrollo futuro de la organización. Entre las segundas podría citarse la adquisición de bienes de equipo, donde disminuyen los riesgos de obsolescencia prematura<sup>5</sup>.

¿Cómo se utiliza?

---

<sup>5</sup> Fuente: TEMAGUIDE "Pautas metodológicas en Gestión de la Tecnología y la Innovación en las empresas". Fundación COTEC

Un análisis de prospectiva tecnológica parte de la identificación del tipo de tecnología que se desea analizar, que habitualmente se engloba en una de las tres categorías siguientes:

- Tecnologías claves: son aquellas que tienen un mayor impacto sobre la rentabilidad de los productos o la mejora de la productividad. Su difusión es limitada y su posesión va a condicionar fuertemente la posición competitiva de la empresa.
- Tecnologías de base: son tecnologías ampliamente disponibles por las empresas de un mismo sector y suele ser común a todos los productos de una actividad concreta.
- Tecnologías emergentes: son aquellas que en una primera fase de su aplicación en la empresa muestran un notable potencial de desarrollo. El nivel de incertidumbre que rodea a estas tecnologías es particularmente elevado.

Esta clasificación está estrechamente relacionada con el concepto de ciclo de vida de la tecnología, donde se distinguen tres etapas: nacimiento, crecimiento y madurez. El nacimiento se asocia a tecnologías emergentes, el crecimiento a tecnologías claves y, finalmente, la madurez y el declive a tecnologías de base.

El conocimiento del tipo de tecnología a analizar permite la selección de un conjunto de técnicas adaptadas en cada caso a la información disponible y al grado de incertidumbre que se asume. Una incertidumbre aumenta conforme se mira hacia un horizonte temporal más distante.

Los métodos clásicos de la prospectiva, como el análisis estructural, los impactos cruzados, el Delfi, los escenarios, etc., se han difundido ampliamente a través de múltiples aplicaciones. Dentro de los más empleados se encuentran el análisis de tendencias, el estímulo a la creatividad, el método matricial y el análisis de

escenarios, a continuación se proporciona una primera aproximación en la selección de herramientas.

	<b>Tecnologías Emergentes</b>	<b>Tecnologías Claves</b> Extrapolación de Tendencias	<b>Tecnologías De Base</b> Métodos estadísticos y econométricos
<b>Analíticas</b>	Analogía Histórica Análisis Delphi Impactos Cruzados	Escenarios exploratorios Simulación	Escenarios exploratorios Simulación
<b>Intuitivas</b>	Escenarios de anticipación		

El análisis de tendencias, conlleva la extrapolación en función del tiempo de ciertas variables, ya sean cuantitativas o cualitativas. La tendencia no es más que el movimiento natural o provocado de un fenómeno o proceso en el tiempo.

Los métodos dirigidos al desarrollo de la creatividad que corresponden generalmente con algunos de trabajo en grupo como son: el método Delfi, la tormenta de ideas y el árbol de objetivos.

El método matricial implican relacionar variables cruzadas entre sí a través de una tabla de doble entrada o una matriz, tales como: la matriz MIC-MAC, matriz DAFO, matriz Logic Frame, y otras herramientas, como SMIC, MACTOR, Morphol o Multipol, entre otras que gracias a la informática han tenido una amplia difusión con menores costos económicos.

El análisis de escenarios consiste en el manejo de variables considerando el factor incertidumbre, en términos de diferentes alternativas. Este método de los escenarios, es el más empleado por la comunidad científica según Godet, (1993)<sup>6</sup>, ya que el mismo impone rigor intelectual al considerar el análisis cualitativo y cuantitativo de las tendencias fuertes, retrospección de los juegos de actores, puesta en evidencia de los indicios de cambio, tensiones y conflictos, construcción

<sup>6</sup> Godet, Michael, 1993. De la anticipación a la acción. Manual de prospectiva y estrategia, (Capítulo 6). Ed. Marcombo, Barcelona

de escenarios coherentes y completos (avances e imágenes futuras). Agrega Godet, (1993), que se realiza en función de la tipología de los problemas al plantearse las preguntas adecuadas, identificar las variantes clave, comprender el pasado y los juegos de actores, barrer el campo de los posibles, reducir la incertidumbre, e identificar y evaluar las opciones estratégicas.

La prospectiva emplea los escenarios como parte de un enfoque alternativo. En lugar de determinar el futuro más probable (previsiones) contempla un abanico de diversos futuros plausibles (generalmente tres o cuatro por razones prácticas porque conceptualmente el número de futuros posibles es ilimitado). En los escenarios se analizan diferentes tipos de variables que pueden ser constantes, predeterminadas e inciertas.

Las variables constantes son las que no varían en el tiempo o el efecto del entorno es despreciable; variables predeterminadas, son aquellas cuyo curso de acción se conoce o es de fácil pronóstico y las variables inciertas son aquellas cuya modificación es difícil de prever. La combinación de las variables anteriores posibilita elaborar tipos de escenarios tales como el tendencial, el más probable de continuar la situación actual y el escenario deseable.

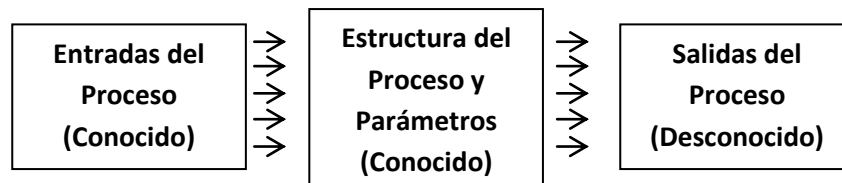
Otra opción es considerar diferentes grados de alternativas o variantes, como pueden ser las siguientes: variante mínima (pesimista), variante media (moderada) y variante máxima (optimista), o establecer una escala ponderada de variables según los atributos o cualidades que se asignen a las variables.

En el mundo actual no puede hablarse de la prospección tecnológica sin considerar las repercusiones ambientales de un producto, proceso o servicio. Existe una atención creciente al análisis de ciclo de vida de las tecnologías, que incluye la consideración de los impactos ambientales del producto, proceso o servicio, durante todo su ciclo de vida, durante la extracción de materia prima, la fabricación (incluyendo el empleo de los recursos naturales necesarios), la distribución, utilización y eliminación final; es decir, desde la cuna hasta la tumba.

## **1.2 ANÁLISIS DE PROCESOS**

El propósito del Análisis de Procesos (AP) es el de modelar y predecir el desempeño de un proceso, ya sea químico, físico, biológico o la combinación de estos, que incluye actividades no solo de evaluación de procesos en funcionamiento sino también, de diseño de nuevos procesos [12]. El AP requiere la descomposición del mismo en sus elementos más sencillos (unidades de proceso) para llevar a cabo el estudio individual del desempeño. A través de técnicas de análisis es posible predecir las características más importantes del proceso como velocidades de flujo, composiciones, temperaturas, presiones, propiedades, dimensiones de equipos, entre otras). Estas técnicas de análisis incluyen modelos matemáticos, correlaciones empíricas y herramientas de simulación de procesos asistida por computadora. Adicionalmente, el AP puede incorporar datos experimentales para predecir y validar el desempeño. Así pues, como se observa en la figura 3, en la simulación de procesos tanto con la información de entrada (Inputs) como con el diagrama de flujo del proceso (Flowsheet) es posible predecir las condiciones de salida (Outputs) [13].

**Figura 3. Esquema general del Análisis de Procesos [13].**



A través del uso de la simulación asistida por computadora se obtienen muchas ventajas, entre las cuales se destacan:

- Permite al diseñador poner a prueba el desempeño del proceso sintetizado de manera rápida y ofrece retroalimentación para las actividades de la síntesis de procesos.
- Se puede engranar con la síntesis de procesos para desarrollar diseños integrados óptimos.
- Minimiza el trabajo experimental y el de escalamiento.

- Permite la fácil exploración de la flexibilidad y sensibilidad del proceso.
- Modela el proceso de manera cuantitativa y brinda información importante acerca del desempeño del proceso.

**1.2.1 Diseño de procesos.** Diseñar incluye el desarrollo de especificaciones y criterios y así mismo, la síntesis, análisis, construcción, prueba y evaluación de soluciones alternativas. En términos generales, el diseño se basa en la definición de los siguientes aspectos:

- Descripción de información inicial.
- Definición del tipo de proceso (por lotes o continuo)
- Descripción de las entradas y salidas.
- Reciclos o subproductos.
- Sistema de separación.
- Integración energética.

Existen diversas metodologías de diseño, las cuales se basan en los aspectos mencionados anteriormente y en el desarrollo de una serie de etapas que permiten la completa consecución de estos pasos.

El procedimiento de diseño puede estar basado en diferentes niveles de información [14, 15], los cuales parten de la definición del tipo de proceso (continuo o por lotes), la estructura de entradas y salidas, la estructura de reciclos y los sistemas de separación.

**1.2.1.1. Información inicial:** La información inicial, provee información acerca del tipo de reacción que se desarrollará en el proceso, es decir, si existen reacciones primarias o secundarias y cuáles son las condiciones de reacción. Así mismo, en este nivel, se da información acerca de la distribución de los productos y los balances a tener en cuenta.

**1.2.1.2. Definición del tipo de proceso:** En la práctica, los procesos pueden ser continuos (procesos diseñados para operar 24 horas por día, y 7 días por semana), o por lotes (procesos que operan por ciclos de operación). Este nivel permite elegir esta característica, teniendo en cuenta aspectos tales como: flexibilidad del proceso, volúmenes de producción, condiciones del mercado y escalamiento.

**1.2.1.3. Descripción de las entradas y salidas:** Un aspecto fundamental de los procesos es la definición de sus corrientes (entradas/salidas). Esto sólo puede ser definido a través de criterios que incluyen la purificación de las corrientes de entrada, la separación de los reciclos o subproductos reversibles, el uso de corrientes de purga en los reciclos gaseosos, la determinación de las corrientes de salida y la selección de las variables de diseño (conversión, relación de alimentación y cantidades de recuperación entre otras).

**1.2.1.4. Estructura de los reciclos:** A través de las corrientes de reciclo se estudian los sistemas de reacción del proceso y sus interacciones. Así como, las variables de diseño en el equilibrio, la estructura de los reciclos y en particular, la necesidad de usar compresores.

**1.2.1.5. Sistemas de separación:** La separación de corrientes en el diseño de procesos, de acuerdo con esta metodología, parte de la determinación de la estructura general del sistema, y termina con una descripción detallada del mismo. Existen dos grandes sistemas de separación: sistema de recuperación de vapor (SRV) y el sistema de separación de líquido (SSL). Dependiendo del tipo de sistema elegido, se deberán definir características tales como: localización, relación del SRV con el SSL, separación y destino de componentes ligeros que pueden llegar a contaminar el producto y el uso de la destilación como proceso base para los SSL.

Sin embargo, es necesario integrar adecuadamente la información ambiental, puesto que en general, los diseñadores de procesos, nunca son expertos en evaluación ambiental y por lo tanto dependen de la información ambiental que sobre materiales y procesos presentan las herramientas actuales, en las que indudablemente, existe una gran incertidumbre en el uso de esta información. Por ello, es necesario que sean ellos, los diseñadores, quienes definan el tipo, cantidad y calidad de información [16].

### **1.3. CADENA PRODUCTIVA DE BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS**

Si en un primer momento los biocarburantes usaron materia prima basada en fuentes de alimentación, los de tercera generación evitan este conflicto gracias al uso de la biomasa. Todas ellas requieren un cierto nivel de mezcla con diésel fósil. Ahora se habla de las microalgas como alternativa capaz de sustituir en su totalidad al diésel convencional.

Hace relativamente poco tiempo la entidad científica empezó a realizar trabajos e investigaciones científicas relacionadas con tecnologías de cultivo y producción de biodiesel de microalgas a gran escala.

El Departamento de Energía de USA (USDE) [17] y más específicamente el Laboratorio Nacional de Energías Renovables, fue pionero en realizar investigaciones acerca de cultivos de microalgas en medios acuáticos para su posterior beneficio y obtención de biodiesel<sup>7</sup>.

Entre los resultados consignados en los informes se destaca principalmente el hecho de que el rendimiento de aceite de microalgas por unidad de área es más de cien veces el rendimiento de los cultivos terrestres para la obtención de

---

<sup>7</sup> El programa comenzó en 1978 y se dio por terminado en 1996.

biodiesel. La tabla 1 enseña las áreas necesarias de diferentes cultivos para remplazar el 50% del diésel consumido en USA por el sector de transporte.

Las microalgas son consideradas como los primeros microorganismos fotosintéticos y responsables en gran medida de la atmósfera terrestre. Sin bien existen muchas especies distintas, las de nuestro interés, adsorben dióxido de carbono del aire y nutrientes del agua, acumulando en su interior importante cantidad de aceite y liberando oxígeno a la atmósfera. Las microalgas se reproducen en forma asexual, se dividen así mismas en dos células, crecen y se dividen otra vez. De la biomasa generada por las microalgas se puede extraer el aceite para fabricar mediante el proceso de transesterificación el biodiesel.

**Tabla 1. Áreas de cultivo necesarias para remplazar el 15% del diésel consumido por el sector de transporte de USA por Biodiesel.**

Cultivo	Rendimiento de aceite (l/Ha)	Área necesaria (MHa)	Area de cultivo existente <sup>4</sup> US (%)
Maiz	172	1.540	846
Soya	446	594	326
Canola	1.190	223	122
Jatrofa	1.892	140	77
Coco	2.689	99	54
Palma Africana	5.950	45	24
Microalga <sup>5</sup>	136.900	2	1.1
Microalga <sup>6</sup> 2	58.700	4.5	2.5

Fuente: Y. Chisti. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25 (2007) 294-306.  
<sup>4</sup>70% (W/W) contenido de aceite en biomasa.  
<sup>5</sup>70% (W/W) contenido de aceite en biomasa.  
<sup>6</sup>30% (W/W) contenido de aceite en biomasa.

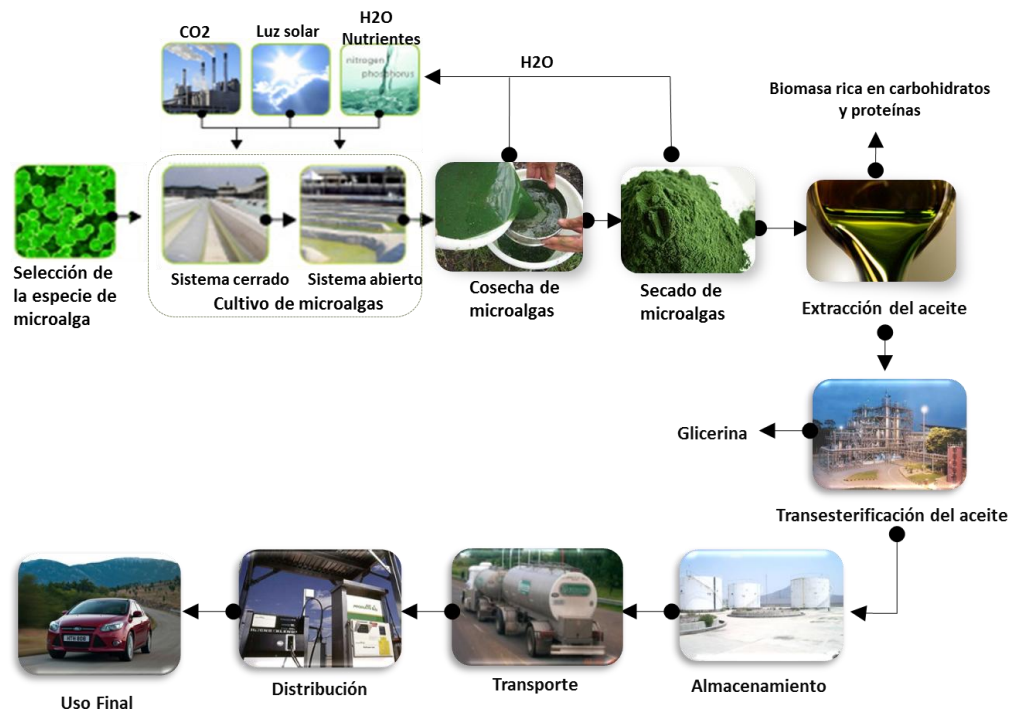
La producción de biodiesel a partir de microalgas es un proceso conformado, en términos generales, por las etapas elementales de producción de biomasa rica en lípidos, recuperación o cosecha de la biomasa, extracción de lípidos y transesterificación, como se ilustra en la figura 4.

**1.3.1 Las microalgas.** Las microalgas son un grupo diverso de microorganismos procariontes y eucariotes que crecen rápidamente debido a su estructura simple. Son taxonómicamente cercanos a las plantas superiores presentes en diversos

ambientes: agua marina, dulce o terrestre; con crecimiento celular individual o colonial, formando extensas poblaciones. Las microalgas puede asumir muchos tipos de metabolismos (fotoautótrofos, heterótrofos, mixotróficos, fotoheterótrofos); debido a cambios en condiciones ambientales.

Medianamente la biomasa de microalga está constituida por 20-30% de lípidos, de 40-50% de proteínas y de la parte restante subdividida entre los carbohidratos, que en algunas especies pueden llegar hasta el 55% de la biomasa, y otros compuestos de importancia menor [18, 19, 20]. Se constituyen así en el producto del más eficiente estado de producción de biomasa en el ciclo de la naturaleza, siendo reconocidas como un excelente recurso medioambiental y biotecnológico.

**Figura 4. Esquema general del Ciclo de producción de Biodiesel a partir de microalgas.**



**1.3.1.1. Lípidos de las microalgas:** Dependiendo de las especies, las microalgas producen diferentes tipos de lípidos, hidrocarburos y otros aceites complejos [21, 22], de los cuales no todos son adecuados para hacer biodiesel. Se han

catalogado las microalgas en diversas clases productoras del aceite: Diatomeas (Bacillariophyceae), Alga Verde (Chlorophyceae), Alga Dorada (Chrysophyceae).

En la actualidad se conoce un sin número de especies de microalgas que presentan un elevado contenido de lípidos. En la tabla 2 se muestra el contenido de lípidos de las microalgas marinas y especies de agua dulce; mostrando diferencias significativas entre las diferentes variedades. El aceite obtenido de las microalgas, creadas en las condiciones adecuadas, podrá ser destinado a la producción de biocombustible como tal o como materia prima en la producción de biodiesel. Los residuos de la biomasa obtenida pueden ser empleados para la producción de biogás y/o bioetanol que puede ser usado por la empresa proveedora del CO<sub>2</sub>.

Los triglicéridos son los lípidos de reserva por excelencia, pudiendo llegar a constituir hasta el 80% del total de la fracción lipídica [18] y se acumulan principalmente en forma de gotitas de aceite en el interior del citoplasma. La cantidad total de lípidos, así como la tipología de los ácidos grasos presentes, además de ser específica para cada especie, está ligada a factores ambientales como la intensidad luminosa, pH, salinidad, temperatura, concentración de nitrógeno y otros nutrientes en el medio de cultivo [21].

**Tabla 2. Contenido de lípidos de diferentes especies de microalgas.**

<b>Especie de microalga marina y agua dulce</b>	<b>Contenido de Lípidos (% biomasa en peso seco)</b>	<b>Productividad de lípidos (mg/L/día)</b>
<i>Ankistrodemus sp.</i>	24 - 31	-
<i>Botryococcus braunii</i>	24 - 75	
<i>Chaetoceros muelleri</i>	33.6	
<i>Chlorella sorokiniana</i>	19 - 22	44.7
<i>Chlorella vulgaris</i>	5 - 58	11.2 - 40
<i>Chlorella</i>	18 - 57	18.7
<i>Dunaliella salina</i>	6 - 25	116

Especie de microalga marina y agua dulce	Contenido de Lípidos (% biomasa en peso seco)	Productividad de lípidos (mg/L/día)
<i>Dunaliella terriolecta</i>	16.7 - 67	-
<i>Elipsoidion sp.</i>	27.4	47.3
<i>Euglena gracilis</i>	14 - 20	-
<i>Haematococcus pluvialis</i>	25	-
<i>Isochrysis sp.</i>	7.1 - 33	-
<i>Monodus subterraneus</i>	16	30.4
<i>Monallanthus salina</i>	20 - 22	-
<i>Nannochloris sp.</i>	20 - 56	-
<i>Nannochloropsis oculata</i>	22.7 - 29.7	84-142
<i>Paviova salina</i>	30.9	49.4
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	18 - 57	44.8
<i>Scenedesmus sp.</i>	19.6 - 21.1	40.8 - 53.9
<i>Spirulina plantesis</i>	4 - 16.6	-
<i>Spirulina máxima</i>	4 - 9	-
<i>Thalassiosira Pseudonana</i>	20.6	17.4
<i>Tetraselmis suecica</i>	8.5 - 23	27 - 36.4
<i>Tetraselmis sp.</i>	12.6 - 14.7	43.4

**1.3.1.2 Beneficios de la producción de aceite de microalgas:** En principio, al igual que las plantas, las microalgas necesitan de tres componentes básicos para su crecimiento: luz solar, agua y CO<sub>2</sub>, y por tanto son conocidas por hacer la biofijación de ese gas.

Las algas requieren aproximadamente 1.6 gramos de CO<sub>2</sub> por cada gramo de biomasa generada y por lo tanto tienen un enorme potencial para capturar las emisiones de CO<sub>2</sub> de los gases de combustión del motor y otras fuentes fijas. En el futuro, una biorefinería basada en algas podría integrar varias tecnologías de conversión diferente para producir algunos biocombustibles como el biodiesel, el etanol y el metano. A diferencia de los biocombustibles de primera generación, los

biocombustibles avanzados, como aquellos derivados de algas, es probable que reduzcan en mayor proporción el uso de combustibles fósiles.

Se dice que una de las ventajas de la producción de biocombustible (biodiesel) a partir de las algas, con relación a fuentes similares, provenientes de la agricultura, se centra en su alto rendimiento productivo. “Cuando se comparan las productividades ( $\text{m}^3$  de aceite producidos por  $\text{km}^2$  de superficie cultivada) las algas alcanzan rendimientos ( $\text{m}^3$  aceite producido por  $\text{km}^2$  cultivado) de 10.000-20.000  $\text{m}^3/\text{km}^2$ , que resultan mucho más elevado que el alcanzado por la colza (120  $\text{m}^3/\text{km}^2$ ), la soja (40  $\text{m}^3/\text{km}^2$ ), la mostaza (130  $\text{m}^3/\text{km}^2$ ) y la palma (600  $\text{m}^3/\text{km}^2$ )”, las algas no parecen afectar a los recursos de agua dulce, son biodegradables y tienen un efecto despreciable si se liberan en el medio ambiente. Sin embargo, siendo realistas, los costos de instalación y operación actuales son demasiado elevados como para que el cultivo de algas pueda reemplazar a otros combustibles disponibles en el mercado [23].

Una de las primeras aplicaciones en desarrollarse fue el empleo de las algas en el tratamiento terciario de las aguas residuales urbanas. Por tanto, son organismos que actualmente son objeto de intensas investigaciones para la búsqueda de nuevos usos productivos como la biorremediación ambiental o la elaboración de biocombustibles [24].

Una de las ventajas de la utilización de la biomasa de algas para la producción de biodiesel es el potencial de mitigación de emisiones de  $\text{CO}_2$  de las emisiones de las centrales eléctricas. El carbón es el recurso más grande de energía fósil disponible en el mundo. El consumo de carbón seguirá aumentando en las próximas décadas, tanto en los Estados Unidos y en el mundo. A través del metabolismo fotosintético, las microalgas absorben  $\text{CO}_2$  y liberan oxígeno. Si una granja de algas se construye cerca de una planta de energía, las emisiones de  $\text{CO}_2$  producidas por la planta de energía podrían ser utilizada como fuente de

carbono para el crecimiento de algas, y las emisiones de carbono se reducirían en el reciclaje de residuos de CO<sub>2</sub> de las plantas de energía en la limpieza de la quema de biodiesel.

**1.3.2. Cultivo de microalgas.** Actualmente no hay biocombustibles producidos a partir de microalgas comercialmente en el mundo. Sólo una pequeña cantidad (aproximadamente en todo el mundo 5000-10000 toneladas) de la biomasa de algas se produce comercialmente hoy día, principalmente para la producción de alto valor, los suplementos de bajo volumen de alimentos y alimentos naturista [25]. Plantas de producción comercial de algas emplean tanto en sistemas abiertos y cerrados de cultivo.

El cultivo de las microalgas requiere el control de parámetros básicos como los presentados en la tabla 3. En esta tabla se exponen los requerimientos principales de los cultivos de microalgas, que pueden servir como datos de referencia.

Además del control de los parámetros mencionados es necesario considerar que para el establecimiento de un sistema de producción de microalgas es importante el dominio de las técnicas de aislamiento, purificación y mantenimiento de cepas, así como el conocimiento de la fisiología, ciclo de vida, bioquímica, etc. de las especies, para determinar su factibilidad de cultivo y sobre todo su contenido de aceites, para poder llevarse a niveles masivos de producción [26].

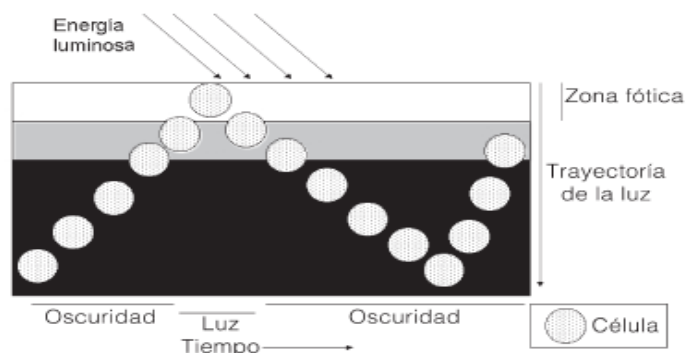
Otro factor importante es la penetración de la luz en el cultivo; en todos los sistemas de cultivo como se observa en la figura 5 las células más cercanas a la superficie iluminada impiden la penetración de la luz hacia el seno del medio de cultivo y producen un efecto de autosombreado sobre las células más alejadas de la superficie donde la intensidad de luz incidente no es suficiente para la fotosíntesis, hasta el fondo del tanque [24].

**Tabla 3. Requerimientos Principales de los Cultivos de Microalgas.**

	Requerimientos	Compuestos químicos	Valores
Físicos	Luz		2,000 – 4,000 lux
	Temperatura		15 – 22°C
	Salinidad		0.37%
	pH		7 – 9
	Redox		
Nutritivos	C	CO <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ≈	g/100 ml
	O, H	O <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	g/100 ml
	N	N <sub>2</sub> NH <sub>4</sub> + NO <sub>3</sub>	g/100 ml
	P	PO <sub>4</sub> ≈	g/100 ml
	S	SO <sub>4</sub> ≈	g/100 ml
	Na, K, Ca, Mg	Sales	g/100 ml
	Fe, Zn, Mn, B, Br, Si	Sales	mg/100 ml
	Cu, Co, Cl, I, Sr, Rb, Al	Sales	μg/100 ml
	Vitaminas	B <sub>12</sub> , tiamina, biotina	μg/100 ml

Fuente: Coll Morales J., 1983. Acuicultura: Marina Animal. Mundi-Prensa, Madrid, p. 237–371.

**Figura 5. Ilustración de la trayectoria de la luz y de los ciclos luz/oscuridad<sup>8</sup>**



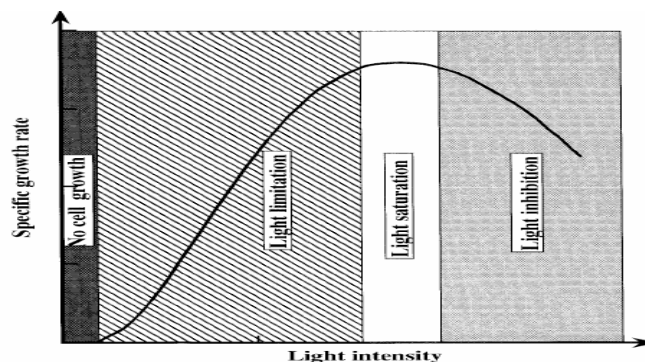
En algunos cultivos se ha estimado que la luz penetra solo de 1 a 2 mm más allá de la superficie, de manera que la zona fótica representa solo una pequeña fracción (10-30%) del volumen total del cultivo [27]. Debido a que el medio de cultivo está en constante movimiento, las células solo son expuestas por breves instantes a la luz, en ciclos que pueden durar desde milisegundos a unas cuantas décimas de segundo.

<sup>8</sup>Fuente: Contreras F. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas.

Un típico ejemplo de los efectos de la intensidad de la luz sobre el crecimiento es indicado en la figura 6, donde el rango de las intensidades depende en gran medida al tipo de célula. Por otro lado, en intensidades de luz muy altas, la fotoinhibición se convierte en un problema muy importante [23], por lo tanto, para la productividad máxima, la intensidad de luz de saturación debe ser homogéneamente distribuida en el fotobiorreactor, que es poco posible en los sistemas de cultivo abierto [25].

Para muchas especies de Diatomeas la temperatura óptima oscila entre los 15 y 20°C, pocas especies de esta familia crecen a más de 28° C, ya las clorofíceas como *Chlorella saccharophila* cultivadas de manera masiva a la intemperie, pueden soportar temperaturas entre 12,5 – 30° C [28, 29].

**Figura 6. Efecto de la intensidad de luz sobre el crecimiento fotoautotrófico de células fotosintéticas<sup>9</sup>.**



**1.3.2.1 Cultivo de tanques al aire libre “piscinas - open pond”:** Las microalgas pueden ser producidas en piscinas abiertas también conocidas como “raceway ponds”, “open pond” o “hipódromo”, son los sistemas más antiguos y simples de cultivo masivo de microalgas. En este sistema, el estanque es por lo general alrededor de un pie de profundidad, y las algas se cultivan en condiciones

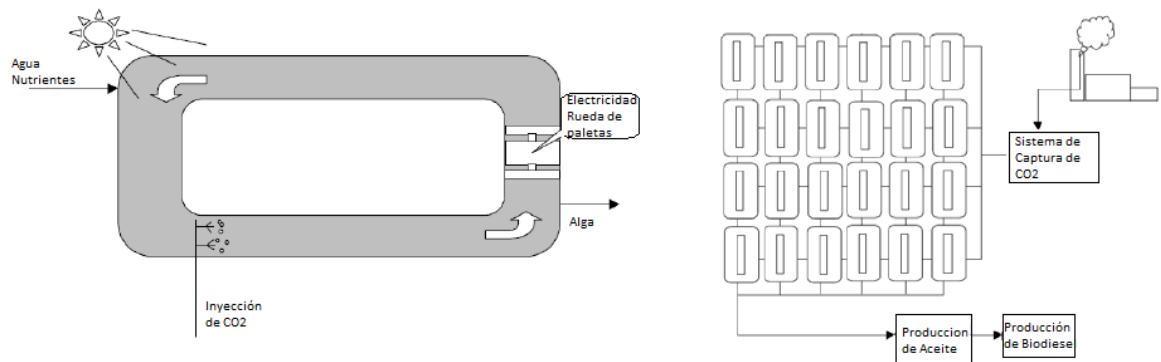
<sup>9</sup>Fuente: Ogbonna, J. C. and Tanaka, H.(2000) Light requirement and photosynthetic cell cultivation – Development of processes for efficient light utilization in photobioreactors.

idénticas a su entorno natural. El estanque está diseñado en una configuración básica de paralelepípedo o de pista de rodadura, en el que circula una rueda de paletas y mezcla de las células de microalgas y de nutrientes (figura 7).

Las pistas de rodadura (raceway) se hacen típicamente de hormigón, o simplemente están excavados en la tierra y revestido con un revestimiento de plástico para evitar que la tierra de absorber el líquido. Pantallas en la guía de canalizar el flujo en las curvas con el fin de reducir al mínimo el espacio.

El sistema suele funcionar en un modo permanente, es decir, la alimentación fresca (incluidos los que contengan nutrientes nitrógeno, fósforo y sales inorgánicas) se añade delante de la rueda de paletas, y el cultivo de algas es cosechado detrás de la rueda de paletas, después de haber circulado a través del circuito. Dependiendo de los nutrientes necesarios para las especies de algas, varias fuentes de aguas residuales, tales como aguas residuales de lácteos/puercos y municipales puede ser utilizado para el cultivo de microalgas. Para algunos tipos de microalgas marinas, el agua de mar o agua con alta salinidad puede ser utilizada [30].

**Figura 7. Cultivo de Microalgas en el sistema de “raceway ponds”**



Fuente: Sheehan, 1998.

Los primeros problemas a resolver en el cultivo masivo son la sedimentación y la fotoinhibición de las algas. Ello se consigue mediante la agitación del cultivo. Existen varios sistemas de agitación que incluyen paletas rotatorias, hélices, agitación manual, pequeñas pendientes o inyección de gases (aire o dióxido de carbono mezclado con aire). La agitación en muchos de estos sistemas se ve favorecida si se añaden divisiones internas en la cubeta de cultivo.

Por otro lado en este sistema se tiene poco control frente a condiciones ambientales tales como temperatura del agua, CO<sub>2</sub>, intensidad lumínica, por lo que el crecimiento del cultivo depende de las condiciones del medio y particularmente se produce en los meses más cálidos. En general, para el cultivo en sistemas abiertos se buscan cepas que puedan crecer bajo condiciones en las que otros organismos les resultaría difícil desarrollarse, con pH altos o bajos, temperaturas específicas, requerimientos nutritivos específicos, etc.

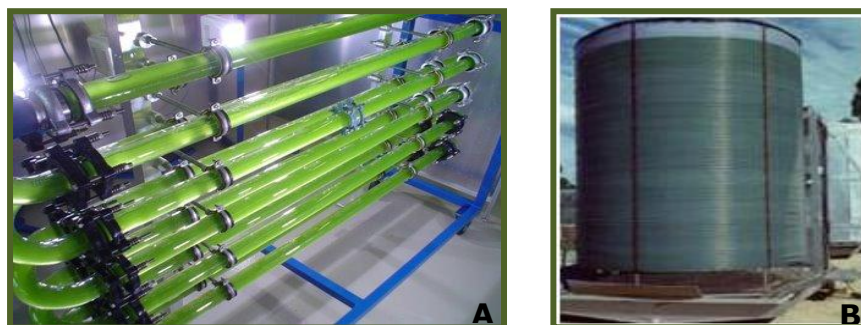
**1.3.2.2. Cultivo de tanques en invernaderos:** Un sistema alternativo para el crecimiento de algas es mediante invernaderos, también en estanque. Aunque se reduce el área de cultivo se solucionan muchos problemas que poseen los sistemas abiertos: menor probabilidad de contaminación por especies no deseadas, pueden cultivarse un mayor número de especies, el periodo de cultivo es mayor ya que hay control de la temperatura y puede incrementarse la cantidad de CO<sub>2</sub> en el ambiente, con lo que también aumentaría la tasa de crecimiento de las algas. Los estanques poseen sistemas que permiten a las algas mantenerse en movimiento en el medio, de forma que todas reciban la misma cantidad de luz y nutrientes.

**1.3.2.3. Los fotobiorreactores:** Los fotobiorreactores son sistemas cerrados que se han empleado para superar la contaminación y los problemas encontrados en los estanques abiertos [31]. Estos sistemas están hechos de materiales transparentes y generalmente son colocados al aire libre para la iluminación con

luz natural. De acuerdo con investigaciones previas, la productividad volumétrica de la biomasa en fotobiorreactores puede ser hasta 13 veces superior a aquellas obtenidas en sistema de “raceway ponds”, debido a una mejor posibilidad de control de los parámetros involucrados en el proceso productivo [29, 32]. Son sistemas muy costosos pero que tienen un alto rendimiento en cuanto a la producción de aceite de algas.

El fotobiorreactor más utilizado es un diseño tubular, que tiene una serie de tubos transparentes, por lo general en consonancia con los rayos del sol (figura 8A). Los tubos son usualmente menos de 10 centímetros de diámetro para maximizar la penetración de la luz solar. El medio de cultivo se distribuye a través de una bomba a los tubos, donde es expuesto a la luz para la fotosíntesis, y luego de vuelta a un depósito. Una parte de las algas por lo general se cosecha después de que pasa a través de los tubos de captación solar, haciendo posible el cultivo de algas continuo [33]. En algunos diseños, los tubos se enrollan en espiral para formar lo que se conoce como un fotobiorreactores helicoidal tubular (figura 8B). Estos sistemas requieren a veces la iluminación artificial, que se añade a los costos de producción, por lo que esta tecnología sólo se utiliza para productos de alto valor como materia prima no biodiesel [33].

**Figura 8. Cultivo de microalga en un fotobiorreactor. (A. Tubular, B. Espiral.).**



El proceso de la fotosíntesis genera oxígeno. En un sistema open recceway, este no es un problema ya que el oxígeno se devuelve a la atmósfera. Sin embargo, en el fotobiorreactor, los niveles de oxígeno se acumulan hasta que se inhiben y envenenan las algas. El cultivo periódicamente debe ser devuelto a una zona de desgasificación en un área donde el cultivo de algas se burbujea con aire para eliminar el exceso de oxígeno.

**1.3.3. Cosecha de microalgas.** Entre varias unidades del proceso involucradas en la producción de biomasa de microalgas, el aspecto de cosecha de la microalga es un factor importante [34]. La recolección de algas consiste en la recuperación de la biomasa del medio de cultivo el cual puede contribuir a un 20-30% del costo total de producción [17]. La concentración de biomasa de algas por litro cuando crecen fototróficamente es normalmente  $0.5-1.0 \text{ gL}^{-1}$  para estanques abiertos (open pond) y aproximadamente  $5-10 \text{ gL}^{-1}$  para sistemas cerrados [33]. Hasta el extremo superior de este rango es aún bajo en comparación con el de fermentaciones bacterianas o de levadura, que puede alcanzar densidades celulares de más de  $100 \text{ g L}^{-1}$ . En  $1 \text{ gL}^{-1}$  de biomasa de algas, 1000 kg de agua deben ser procesados para capturar 1 kg de biomasa. Incluso si la biomasa contiene 50% triglicéridos (TAG), aproximadamente 1800 galones de cultivo se necesitarán para producir un solo galón de aceite de microalgas.

Este proceso tiene como fin eliminar grandes cantidades de agua y recuperar grandes volúmenes de biomasa de algas. Las principales técnicas actualmente aplicadas en la recolección de microalgas incluyen centrifugación, floculación, filtración, sedimentación por gravedad, flotación y técnicas de electroforesis [18].

**1.3.3.1 Centrifugación:** Pruebas de laboratorio han demostrado que alrededor del 80-90% de las microalgas puede ser recuperada por este sistema. Pero aunque la centrifugación genera altas eficiencias de recuperación, este método presenta algunas desventajas como el daño en la estructuras de las células ante altas

fuerzas gravitatorias [19]. Además, el procesamiento de grandes volúmenes de proceso mediante la centrifugación resulta ser muy lento y costoso [17].

**1.3.3.2 Floculación:** La floculación es un proceso en el cual partículas dispersas se aglomeran entre sí para formar partículas de mayor tamaño y así facilitar la su recuperación mediante sedimentación, flotación y o filtración [20]. Dado que las células de microalgas tienen una carga negativa que impide la agregación natural de las células en suspensión, la adición de floculantes neutraliza o reduce la carga negativa lo que da como resultado la formación de los flóculos [20]. El sistema de floculación se puede aplicar varias especies de microalgas pudiéndose obtener eficiencias mayores al 80% [35]. Las materias primas utilizadas como floculante son el cloruro férrico ( $\text{FeCl}_3$ ), sulfato de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) y sulfato férrico ( $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ) [36].

**1.3.3.3 Sedimentación por gravedad:** Los parámetros más importantes para la sedimentación son la densidad y el radio de las células de las algas [37]. Esta técnica es de uso común para recolección de biomasa de aguas residuales debido a los grandes volúmenes que pueden ser tratados [20]. Sin embargo, este método es sólo apto para microalgas grandes (~70  $\mu\text{m}$ ) como la espirulina [38], por esta razón en la mayoría de los casos la sedimentación va precedida de un proceso de floculación que ayude a aumentar el tamaño de las células.

**1.3.3.4 Filtración:** La filtración convencional es adecuada para la recolección de microalgas relativamente grandes (> 70  $\mu\text{m}$ ) como coelastrum y espirulina, y no se puede utilizar para la cosecha de algas muy pequeñas (<30  $\mu\text{m}$ ) [20]. Estudios realizados han demostrado que los procesos de filtración pueden alcanzar un factor de concentración de 245 veces al inicial [39]. Para la recuperación de células de algas más pequeñas (<30  $\mu\text{m}$ ), la microfiltración y ultrafiltración por membranas son alternativas técnicamente viables [38].

**1.3.3.5 Flotación:** La flotación es un proceso de separación por gravedad en la que el aire es agregado en forma de burbujas para luego llevar las partículas sólidas a la superficie del líquido [40]. La flotación es más beneficiosa y eficaz que la sedimentación en lo que respecta a la eliminación de microalgas [41]. Con base en los tamaños de burbuja utilizados en el proceso de flotación, esta puede ser flotación por aire disuelto (DAF) o flotación por aire disperso [40].

**1.3.3.6 Técnicas electrolíticas:** El método electrolítico es un proceso en el cual se desestabilizan las partículas de algas formando unos flóculos sin necesidad de añadir productos químicos si no que induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas. Hay varias ventajas en la utilización de métodos electroquímicos como la amabilidad ambiental, versatilidad y la selectividad [42].

**1.3.4 Secado de microalgas.** En seguida de la etapa de cosecha viene el secado de la biomasa o deshidratación que es un proceso de conservación que permite eliminar una gran cantidad de agua de las microalgas, impidiendo cualquier cantidad microbiana o enzimática que las deteriore.

El método al sol, es la alternativa menos costosa y fácil de utilizar para deshidratación de la biomasa, también es adecuada en países donde la tecnología es baja. Sin embargo la desventaja incluye largos tiempos de secado, requiere de mayor superficie. También se encuentran freeze dryer, este método de secado aunque funciona bien a escala de laboratorio presenta el mismo inconveniente que la centrifugación ya que es demasiado costoso para ser implementado a escala industrial. Otras tecnologías que se han investigado y tienen alto grado de eficiencia y mucho más costosas son: tambor de secado, secado en lecho fluidizado, deshidratación en ventana refractante, secado por spray drying.

**1.3.5. Extracción de aceite de microalgas.** Las microalgas normalmente contienen triglicéridos (TAG) en forma de gotas de lípidos en la célula. Para llegar a ser accesible para la producción de biocombustible, este lípido debe ser extraído de la célula. En el marco del Programa de Especies Acuáticas en el National Renewable Energy Laboratory, extracción por solvente ha sido el método de elección para quitar y recoger este material hidrofóbico. Sin embargo, las preocupaciones sobre el costo, escalabilidad, y los riesgos ambientales asociados con solventes como el hexano puede limitar este enfoque. Por lo tanto, las solicitudes de subvención para desarrollar tecnologías innovadoras para la extracción de los lípidos de las células de microalgas, permitiendo así a la eficaz en los costes de producción de lípidos como materia prima para el biodiesel o los biocombustibles [43].

Los microorganismos están compuestos de una pared celular que rodea el protoplasma y el citoplasma. El citoplasma está compuesto de una gran proporción de productos tales como lípidos, proteínas, carbohidratos, entre otros. Con el fin de aislar y extraer estas sustancias del interior de la célula es necesario romper la pared celular y la membrana protoplasmática, este rompimiento se conoce como disrupción celular [44, 45].

En la extracción de aceite para facilitar el contacto entre el solvente y los compuestos dentro de la microalga se han propuesto diversos métodos entre los que se encuentran lisis enzimática, shock osmótico, hidrólisis, organosolv, entre otros [46]. En recientes estudios se ha determinado que el uso de hidrólisis acida utilizando una solución de HCL 0.5 M como pretratamiento en la extracción de aceite de microalgas genera un aumento en la eficiencia del proceso [47]. A continuación se muestran los métodos utilizados en la extracción de aceite de microalgas a nivel laboratorio.

**1.3.5.1. Extracción Con Solventes Químicos:** Este método ha sido utilizado tradicionalmente para obtener lípidos en algas, el solvente es adicionado a la biomasa seca, posteriormente se realiza la separación de la biomasa y la purificación del aceite. Una gran variedad de solventes orgánicos suelen ser utilizados, siendo los más populares el hexano y el etanol, mediante una mezcla hexano-etanol, con la cual es posible extraer hasta el 98% de los lípidos presentes en la biomasa [46].

**1.3.5.2. Bligh & Dyer:** Este método consiste en la homogenización a alta velocidad de la biomasa con una mezcla de los solventes metanol/cloroformo, luego se agrega agua para formar una fase hidroalcohólica. Después se realiza una filtración y centrifugación de la cual quedan separadas las fases metanol-agua y cloroformo-lípidos, se realiza una evaporación de cloroformo y se obtiene el aceite extraído [48].

**1.3.5.3. Extracción Asistida por Microondas:** La extracción asistida por microondas aprovecha la polaridad de las moléculas que componen la estructura de la microalga como los lípidos y las proteínas para crear fricción y por consiguiente calor, lo cual hace que el agua contenida en la célula escape debilitando la pared celular [49].

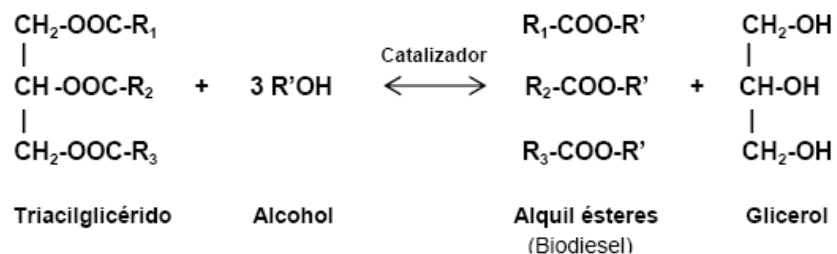
**1.3.5.4. Extracción In Situ:** Este método consiste principalmente en dos etapas, en la primera etapa se realiza una mezcla solvente-biomasa, en la cual se distinguen dos fases la fase de extracto lipídico crudo y la fase de biomasa residual. La segunda etapa consiste en la recuperación del extracto lipídico y su posterior purificación. Se han evaluado los solventes hexano y ciclohexano para la extracción de aceite de microalgas [50].

**1.3.5.5. Extracción con Fluidos Supercríticos:** Esta técnica hace uso de un solvente, generalmente CO<sub>2</sub>, a condiciones de presión y temperatura superiores a las condiciones críticas, lo cual confiere al compuesto propiedades de gas y líquido, que aumenta la selectividad y permite una penetración más fácil y rápida en los sólidos, facilitando la extracción [51, 52].

**1.3.5.6. Extracción Enzimática:** En la extracción enzimática se degrada la pared celular de las microalgas mediante el empleo de enzimas, esto facilita la salida de los aceites presentes en la célula. Pero, la actividad enzimática es susceptible a muchas variables [53].

**1.3.6 Esterificación - transesterificación del aceite para obtener biodiesel a partir de microalgas.** La transesterificación o alcoholólisis (figura 9) es la reacción química ocurrida entre los aceites (triacilglicéridos) y un alcohol (comúnmente metanol, etanol, propanol o butanol) para producir glicerol y alquil ésteres de ácidos grasos, los cuales son conocidos como biodiesel. Todo este proceso se lleva a cabo en un reactor donde se producen las reacciones y en posteriores fases de separación, purificación y estabilización [54]. Los principales factores que influyen en el proceso son la relación molar alcohol: glicéridos, el tipo de catalizador (álcali, ácido, lipasas), la temperatura, el tiempo de reacción y el contenido de agua y ácidos grasos libres en la materia prima. En la actualidad, la mayoría del biodiesel es producido mediante transesterificación alcalina, a causa de su rapidez y condiciones moderadas que la caracterizan [54,55].

**Figura 9. Reacción general de transesterificación. R1, R2, R3 y R' son radicales alquilo. Los catalizadores pueden ser álcalis, ácidos o enzimas (lipasas). [55, 56, 57].**



El método más simple para la producción de biodiesel donde se han reportado ratios 6:1 (alcohol:triglicérido) es el proceso discontinuo. Se trata de reactores con agitación, donde el reactor puede estar sellado o equipado con un condensador de reflujo. Las condiciones de operación más habituales son a temperaturas de 65°C, aunque rangos de temperaturas desde 25°C a 85°C también han sido publicadas.

El catalizador más común es el NaOH, aunque también se utiliza el KOH, en rangos del 0,3% al 1,5% (dependiendo que el catalizador utilizado sea KOH o NaOH). Es necesaria una agitación rápida para una correcta mezcla en el reactor del aceite, el catalizador y el alcohol. Hacia el fin de la reacción, la agitación debe ser menor para permitir al glicerol separarse de la fase éster.

Las propiedades físicas y de combustión del biodiesel obtenido de microalgas en general son comparables con las del diésel fósil. El biodiesel de microalgas presenta un menor punto de formación de grumos o de obstrucción del flujo (Cold Filter Plugging Point), alrededor de -11°C menos que el diésel convencional.

En la tabla 4 se muestran las propiedades de un biodiesel obtenido de *Chlorella protothecoides* [58]. En la literatura no se encuentra con facilidad información sobre pruebas de combustión con biodiesel a partir de microalgas debido a que la mayoría de investigaciones respecto a este biocombustible están en desarrollo o están siendo realizadas por sectores que no están dispuestos a divulgar la información obtenida.

**Tabla 4. Comparación de las Propiedades de Biodiesel de Algas con los Valores Estándar ASTM para Biodiesel.**

Propiedad	Biodiesel de <i>Chlorella Protothecoides</i>	Valor estándar ASTM
Densidad (kg/l)	0,864	0,86 – 0,90
Viscosidad (mm <sup>2</sup> /s a 40°C)	5,2	3,5 – 5,0
Flash Point (°C)	115	Min 100
Punto de solidificación (°C)	-12	
Punto formación grumos (°C)	-11	Verano máx 0 – Invierno máx -15

Propiedad	Biodiesel de <i>Chlorella Protothecoides</i>	Valor estándar ASTM
Acidez (mg KOH/g)	0,374	Máx 0,5
Poder calorífico (MJ/kg)	41	
Relación H/C	1,81	

Fuente: Han Xu, Xiaoling Miao, Qingyu Wu. High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. Journal of Biotechnology 126 (2006). 505 p.

#### 1.4. ESTUDIOS PREVIOS DE ACV DE LOS BIOCOMBUSTIBLES DE MICROALGAS

El análisis de ciclo de vida (ACV) se ha convertido en una parte integral de la evaluación de la energía y de efectos ambientales de productos en general y productos energéticos en particular. Extensos ACV han sido desarrollados para plantas de biocombustibles, y varios ACV se han realizado para biocombustibles basados en microalgas. En esta sección, aunque no es un examen exhaustivo, coloca a la vista los factores claves identificados por estos ACV que proporcionan una gran ayuda al presente trabajo.

Kadam (2001) considera una central de carbón co-alimentada con biomasa cultivada de algas utilizando gases de combustión de la misma planta de energía para el crecimiento de algas. Kadam llegó a la conclusión de que las reducciones de emisiones de GEI fue posible, sin embargo, si la captura de monoetanolamina (MEA) de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) fue empleado para purificar y concentrar las emisiones de CO<sub>2</sub> en los gases de combustión, muchos de los beneficios se perdieron a causa de las altas necesidades de vapor para la regeneración de MEA [59].

Campbell et al. (2009) estudió los escenarios para la producción de biocombustible de algas desde gas de combustión en Australia. Siete de las nueve centrales consideradas en el informe no tienen tierras suficientes a mano para los estanques de algas. Por lo tanto, los autores consideran la distribución de los

gases de combustión y se concluyó que la distribución de presiones altas requiere inaceptablemente elevada potencia de funcionamiento, mientras que la distribución de baja presión presentó los desafíos relacionados con el capital y el tamaño de la tubería [60].

Lardon et al. (2009) estudiaron cuatro escenarios, dos con la extracción de aceite de algas seca con hexano (usando una aproximación a la extracción de aceite de soja) y dos con la extracción húmeda hipotética con hexano. Los escenarios de extracción seca que necesita el secado de la biomasa húmeda a 10% de humedad, de forma similar a la soja. Este secado requiere más energía que la demandada en la biomasa de algas cosechadas. Se formuló la hipótesis de que el proceso de extracción en húmedo usa un método de extracción con solventes para la biomasa húmeda. El estudio puso en evidencia la importancia de aumentar la fracción lipídica de la biomasa de algas. El análisis demostró que cualquier mejora en la técnica de extracción tendría un impacto directo en la sostenibilidad del proceso. Se demostró que gran parte de la energía de la biomasa de algas (valor calórico) permanece en los restos de biomasa después de la extracción de aceite [61].

Clarens et al. (2010) compararon la producción de algas con la de varios cultivos energéticos (maíz, pasto y colza). El estudio se basó en Virginia, Iowa y California en los EE.UU., cada uno de los cuales tienen diferentes niveles de la radiación solar y la disponibilidad de agua, cinco categorías de impacto fueron evaluadas: el consumo de energía (MJ), el uso del agua ( $m^3$ ), las emisiones de gases de efecto invernadero (kg de  $CO_2$  equivalente), uso de la tierra (ha), y la eutrofización (kg  $PO_4$ ). El estudio enfatiza en la importancia de controlar la demanda de nutrientes para el crecimiento de las microalgas [62].

Stephenson et al. (2010) compararon la producción de algas en estanques mezclados con rueda de paletas con la producción en fotobiorreactores tubulares.

El análisis considera un modelo de crecimiento de dos etapas en el cual un cultivo inicial de nutrientes totales con alta productividad, seguido por una etapa de nitrógeno limitado para aumentar la fracción lipídica de la biomasa. Los autores señalan que para mantener la suspensión de microalgas el mezclado requiere una cantidad significativa de energía eléctrica. Además, el consumo de energía para la rueda de paletas en un estanque era ocho veces menor que mezclar con aire comprimido en el fotobiorreactor cuando la velocidad de circulación fue de 30 cm/s [63].

Sander y Murthy (2010) este era un estudio de la cuna a la tumba que tuvo como objetivo determinar la sostenibilidad global de biodiesel de microalgas e identificar los cuellos de botella energéticos y de emisión. La fuente principal de agua se trató de aguas residuales, y esto se supone que contiene todos los nutrientes necesarios, excepto para el dióxido de carbono. La filtración y la centrifugación se compararon para el sistema de cosecha de microalgas. Los lípidos se extrajeron con hexano, y luego fueron transesterificados [64].

Campbell et al. (2011) este estudio se centró en los impactos ambientales y la viabilidad económica del crecimiento de algas en estanques abiertos (paletas de rodadura) con agua de mar. Los lípidos se extrajeron con hexano, y luego fueron transesterificados. La ubicación de este estudio fue en Australia, que tiene una alta incidencia solar, pero la oferta limitada de agua dulce. Los resultados indican que las condiciones favorables del suelo, la tecnología actual y el elevado crecimiento anual hacen económicamente viable para reducir los GEI en el sector del transporte en Australia por el crecimiento de microalgas y el proceso de este a biodiesel [65].

Khoo H.H. et al (2011). Pese a las afirmaciones de que los biocombustibles de microalgas son alternativas ambientalmente amigables a los combustibles convencionales, debate en torno a los beneficios o inconvenientes ecológicos que

todavía existe. El ACV se utiliza para analizar las diferentes tecnologías de producción de biocombustibles "de la cuna a la tumba". Balances de energía y CO<sub>2</sub> se llevan a cabo para una producción hipotética de biodiesel a partir de microalgas integrada de raceway-fotobiorreactores en Singapur. Sobre la base de una unidad funcional de 1 MJ de biocombustibles, las demandas totales de energía son 13% de la producción de biomasa, 85% a partir de la extracción de lípidos, y 2% de la producción de biodiesel. El análisis de sensibilidad se llevó a cabo para los ajustes en los requerimientos de energía y el contenido de lípidos porcentuales [66].

Una vez realizadas y evaluadas cualitativamente, las diferentes tecnologías en cada etapa del proceso, soportado esto en información reportada en la literatura y con estudios previos de ACV, es posible determinar que las etapas con una mayor incidencia y por lo tanto con mayor potencialidad de generar un impacto directo en la sostenibilidad del proceso de producción de biodiesel de microalgas son el proceso de recolección de biomasa (cosecha) y el proceso de extracción de aceite de microalgas. Con base en lo anterior, en este trabajo de investigación son las tapas sobre las cuales se hará mayor énfasis en el análisis.

## 2. DESARROLLO METODOLOGICO

El capítulo anterior presenta una breve descripción del desarrollo del método de evaluación ambiental, método de análisis de procesos, y una revisión detallada de cada una de las etapas del proceso que serán el fundamento en el transcurso de esta investigación. La metodología propuesta para el desarrollo de esta investigación se presenta en la figura 10, el cual comprende los siete pasos que se desarrollan a continuación.

Figura 10. Metodología del plan de investigación



## **2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Se realizó una búsqueda exhaustiva de información en libros, tesis, artículos y patentes sobre las especies de microalgas y sus características principales. Así mismo se investigaron las tecnologías prospectivas que involucran el ciclo de producción de biodiesel a partir de microalgas y los requerimientos de masa y energía en cada etapa analizada o proceso unitario.

Como resultado de la búsqueda bibliográfica antes mencionada, se cuenta con una amplia bibliografía relacionada con las microalgas, desde la antigüedad las microalgas se han usado como alimento humano, sin embargo es hasta ahora que han atraído la atención para la investigación de su potencial biotecnológico. La mayor parte de esta bibliografía está relacionada con su aplicación como materia prima para diferentes procesos: obtención de proteína de bajo costo para la nutrición humana, la acuicultura (cultivo de especies acuáticas vegetales y animales en medios naturales y artificiales), el tratamiento de aguas residuales, la obtención de sustancias químicas finas, la producción de farmacéuticos y los procesos de bioconversión energética. La producción de bioenergía a partir de microalgas ha sido también contemplada, encontrándose información de procesos de producción de bioenergía a partir de microalgas a nivel laboratorio.

## **2.2. SELECCIÓN DE LA ESPECIE DE MICROALGA**

Existe una gran cantidad de especies de microalgas, por esta razón se realizó una depuración preliminar en la literatura científica de las cepas de microalgas. Las microalgas con elevadas productividades lipídicas son deseables para la elaboración de biodiesel, razón por la cual la cantidad de lípidos contenidos en la biomasa, productividad por área y la velocidad de crecimiento, sumados a la eficiencia metabólica, tolerancia de CO<sub>2</sub>, facilidad de producción, bajos costos de montaje, uso comercial y principalmente disponibilidad de información sobre la

caracterización fisicoquímica de la biomasa son parámetros relevantes para su selección. En la literatura científica se ha reportado información muy variada y extensa acerca de los perfiles composicionales de las microalgas y de sus potenciales de producción a gran escala, algunas de las especies más prometedoras para producción de biodiesel son: *Botryococcus braunii*, *Chlorella sp.*, *Dunaliella*, *Spirulina platensis*, *Nannochloropsis sp.* y *Phaeodactylum tricornutum*.

La cantidad media de lípidos en las microalgas varía entre 1% y 70% [33,67]. El contenido de aceite de microalgas puede alcanzar un 75% en *Botryococcus braunii*, sin embargo esta especie se asocia a una baja productividad [66]. Las microalgas más comunes tales como la *Chlorella sp.*, *Dunaliella salina*, *Nannochloropsis oculata*. y *Phaeodactylum tricornutum* poseen niveles de aceite entre 20% y 50% con productividades entre 11 mg L<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> y 142 mg L<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup> como se observa en la tabla 5.

Además, la elección de las especies de microalgas debe abordar las características específicas que permiten el uso de gas de combustión como fuente de CO<sub>2</sub>. Muchas investigaciones se han hecho en la tolerancia de las diferentes especies de gases de combustión. Se encontraron varias especies que son apropiadas para el crecimiento de las microalgas utilizando gas de combustión. Una de estas especies es la especie de *Chlorella* [34]. Sung *et al.* (1999) informó que la *Chlorella* creció en condiciones ambientales de hasta 40°C.

Illman *et al.* (2000) [68] ha estudiado valores caloríficos de cepas de *Chlorella* cultivadas en un medio bajo de nitrógeno incluyendo cuatro cepas de agua dulce (*Chlorella protothecoides*, *Chlorella vulgaris*, *Chlorella emersonii* y *Chlorella sorokiniana*) y una cepa marina (*Chlorella minutissima*), las cepas *Chlorella* sugeridas puede ser adecuadas para reemplazar el diesel. Xu *et al.* [58] obtuvieron una alta producción de biodiesel de calidad de microalgas heterotróficas *Chlorella protothecoides*. Adicionalmente la relación entre las condiciones ambientales de

cultivo y el contenido de ácidos grasos ha sido objeto de numerosos estudios. Petkov y García (2007 [69]) recopilaron la información publicada hasta la fecha de la composición de la *Chlorella vulgaris* y *Chlorella sp.* reportada por diversos autores y bajo una variedad de condiciones de crecimiento: al aire libre, en laboratorio, en ausencia de nitrógeno, entre otras.

**Tabla 5. Contenido de lípidos y productividad de las especies de microalgas promisorias para producción de biodiesel.**

Especie de microalga marina y agua dulce	Contenido de Lípidos (% biomasa en peso seco)	Productividad de lípidos (mg*L <sup>-1</sup> *día <sup>-1</sup> )
<i>Botryococcus braunii</i>	24 – 75	-
<i>Chlorella sorokiniana</i>	19 - 22	44.7
<i>Chlorella vulgaris</i>	5 - 58	11.2 - 40
<i>Chlorella sp.</i>	28 - 32	42.1
<i>Dunaliella salina</i>	6 – 25	116
<i>Dunaliella terriolecta</i>	16.7 - 67	-
<i>Haematococcus pluvialis</i>	25	-
<i>Nannochloris sp.</i>	20 – 56	-
<i>Nannochloropsis oculata</i>	22.7 – 29.7	84-142
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	18 - 57	44.8
<i>Scenedesmus sp.</i>	19.6 - 21.1	40.8 – 53.9
<i>Spirulina plantesis</i>	4 – 16.6	-
<i>Spirulina máxima</i>	4 - 9	-

El contenido de lípidos de *Chlorella* varía típicamente entre un rango de 28-32 % en peso seco [34], pero puede llegar a 46% en peso seco bajo condiciones de estrés [70] y 55% en peso seco si es cultivada heterotróficamente [38]. Información acerca de la composición de ácidos grasos de diferentes microalgas (es decir, las algas verdes en las clases *Chlorophyceae* y *Prasinophyceae*) se publicó en 1992 [71]. La *Chlorella* está en la clase de *Chlorophyceae* y las composiciones de ácidos grasos de tres especies de *Chlorella* fueron listadas. Fue interesante observar que la *Chlorella protothecoides* incluye la misma composición

de ácidos grasos presentes en la *Chlorella sp.* elegida, pero en proporciones ligeramente diferentes.

En esta investigación, la especie *Chlorella sp.* es seleccionada debido a que crece en condiciones ambientales de temperatura hasta de 40°C, en agua salada y dulce, bajo condiciones de estrés, permite el uso de gas de combustión como fuente de CO<sub>2</sub> y presenta una disponibilidad de información acerca de su composición (ácidos grasos, triglicéridos, aminoácidos y carbohidratos) ya que es una especie estudiada desde hace varios años. Además, es usada comercialmente ya que esta es utilizada en los cultivos masivos para la acuicultura como alimento para alimentar a los peces y ha demostrado su solidez en el cultivo masivo. Otra razón por la que fue elegida *Chlorella sp.* es su facilidad potencial para su uso en simulación.

### **2.3. IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS PARA CADA ETAPA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL**

Existe una gran cantidad de métodos disponibles para cada una de las etapas involucradas en el ciclo de producción de biodiesel de microalga, con sus respectivas ventajas y limitaciones. La selección de cada tecnología influye de manera significativa en los costos y los indicadores ambientales.

La producción de biodiesel de microalga (considerado como un biocombustibles de tercera generación) es un proceso que no se encuentra aún en producción a nivel industrial, lo que añadido al hecho de que la bibliografía disponible está orientado sobre todo a escala piloto, generó la necesidad de utilizar modelos y simulaciones a partir de datos de laboratorio. Del mismo modo, se usó tecnologías base que son ampliamente disponibles a nivel industrial en los diferentes procesos unitarios y poseen disponibilidad de información de operación y funcionamiento.

Para evaluar la producción de biodiesel microalga fue necesario realizar una selección de cada una de las etapas a través de las siguientes consideraciones como: condiciones de operación, costos de operación, consumo energético y disponibilidad tecnológica. Para esto se realizó una valoración cualitativa de las diferentes tecnologías base en cada etapa del proceso con información reportada en la literatura sobre implementación de esta en la industria.

**2.3.1. Selección de la tecnología de cultivo de microalgas.** En esta etapa posteriormente de realizar una comparación entre los sistemas de cultivo abiertos (open pond) y cerrados (fotobiorreactores) como se muestra en la tabla 6 y teniendo en cuenta características de los sistemas de cultivo como: costos de operación y construcción, mantenimiento, contaminación, limpieza y disponibilidad de tecnología. De acuerdo a Chisti (2007), el cultivo de microalgas en estanques abiertos es más adaptable a la producción de masa que los fotobiorreactores, incluso si la razón de crecimiento es más baja en estanques abiertos que en fotobiorreactores. De acuerdo a Jorquera *et al.* (2009) actualmente el ratio de energía neta para biomasa total es más alto en estanques abiertos que en fotobiorreactores. Conforme a Del Campo *et al.* (2007) los costos económicos de los de los fotobiorreactores son más altos que los estanques abiertos, además, según resultados mostrados por Stephenson *et al.* (2010) muestran que para la producción de biodiesel la electricidad y el calor requerido durante el cultivo de microalga *chlorella vulgaris* con el fotobioreactor tubular consume significativamente más energía que el cultivo de estanques, por lo tanto, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) son también altas.

Con lo anterior en este estudio se seleccionó el cultivo de sistemas abiertos, principalmente porque presenta bajos costos de operación y construcción, consumos de energía bajos comparado con los fotobiorreactores, información disponible en la literatura sobre su construcción y es una tecnología base que es implementada en acuicultura y en tratamiento de aguas residuales actualmente.

Además la generación de biomasa de microalgas ha sido estudiada y evaluada de manera muy extensa en los sistemas abiertos raceway ponds.

**Tabla 6. Principales ventajas y limitaciones de los sistemas de cultivo de microalgas [72].**

SISTEMAS DE CULTIVO	VENTAJAS	LIMITACIONES
Sistemas Abiertos (open pond)	Sencillos y baratos de construir Costos de operación bajos (paddle Wheel, adición de CO <sub>2</sub> ). Fáciles de mantener y limpiar Entrada de energía baja	Bajo control de las condiciones del cultivo Fáciles de contaminar por otras especies. Pérdidas de agua por evaporación.
Sistemas Cerrados (fotobiorreactores)	Menor contaminación, Menor uso de agua y menor pérdida de CO <sub>2</sub> Mejor utilización de la luz Control en la condiciones de cultivo.	Altos costos de operación y construcción (adición de CO <sub>2</sub> , remoción de oxígeno, enfriamiento, limpieza) Altos consumos de energía Dificultad en el escalado Difícil control de temperatura del cultivo Daño celular por turbulencia Deterioro de materiales y de equipo por corrosión. Contaminación por acumulación de oxígeno y CO <sub>2</sub> .

**2.3.2. Selección de la tecnología de cosecha de microalgas.** Después de realizar la selección del sistema de cultivo de microalgas se siguió con la selección de la tecnología de Cosecha. La recolección de biomasa ha sido señalada como uno de los principales cuellos de botella en el sistema de producción de biodiesel [73, 74]. La floculación química se emplea con frecuencia en las operaciones de tratamiento de aguas residuales para mejorar la eficiencia de la deshidratación posterior. En la literatura, se supone habitualmente que las técnicas de floculación

química para lodos de aguas residuales se aplican a la cosecha de microalgas [61, 62, 133]. La centrifugación es usualmente eficiente pero también es costosa para un propósito de producción energética y requiere consumo de energía altos [73]. Para la selección se tuvo en cuenta las mismas características usadas en la etapa de cultivo. En la tabla 7 se muestra una comparación de los sistemas de cosecha de microalgas empleados para recolección de biomasa para producción de biodiesel.

**Tabla 7. Principales ventajas y limitaciones de los métodos de cosecha.**

MÉTODOS	VENTAJAS	LIMITACIONES	REFERENCIAS
Floculación	Bajos costos de operación. Viable a escala industrial. Alta eficiencia. El proceso es muy seguro. Bajos consumos de energía	Se requiere constante monitoreo del proceso.	[75] [76] [73]
Filtración	Alta eficiencia. Amabilidad con el medio ambiente. Alta seguridad.	Altos costos de operación. Altas caídas de presión, proceso muy lento. Difícil mantenimiento.	[75] [77] [78]
Centrifugación	Alta eficiencia. Amable con el medio ambiente.	Altos costos de operación ya que requiere alta dosis de energía. No es fiable a escala industrial se aplica básicamente a procesos de pequeña escala. Sujeto a riesgos operacionales.	[73] [79] [77]
Sedimentación por gravedad	Bajos costos de operación. Amable con el medio ambiente. Fácil control. Altamente seguro.	El proceso es muy lento. Se requiere una gran diferencia de densidades para que el proceso sea eficiente.	[75] [80]
Flotación	Alta eficiencia. Amable con el medio ambiente.	Altos costos de operación. El proceso es muy lento Difícil control Sujeto a riesgos operacionales.	[75] [82] [83]

MÉTODOS	VENTAJAS	LIMITACIONES	REFERENCIAS
Técnicas electrolíticas	Altamente eficiente.	Altos costos de operación. No es viable a escala industrial. Difícil control. Está sujeto a riesgos operacionales (cortos circuitos). Difícil mantenimiento.	[75] [81]

De acuerdo a esto, para la implementación del sistema de cosecha de microalgas es la floculación seguida por una filtración, debido a que presenta características como bajos costos de operación y bajos consumos de energía, impactos medio ambientales bajos, requiere de equipos simples, de fácil mantenimiento y operación, además es una tecnología base que es implementada actualmente. Es un sistema que cuenta con disponibilidad de información, ya que estos procesos de cosecha de microalgas se asemejan en gran parte a los sistemas de floculación basados en plantas de tratamiento de aguas residuales como se ha mencionado anteriormente.

Por otro lado, en la literatura científica se hace referencia en esta etapa del proceso de equipos implementados a escala piloto en la separación sólido-liquido llamados Decanter Centrífugos (equipos utilizados para separar dos o más fases de peso específico diferentes) destacados por ser eficientes aunque presentan requerimientos altos de energía.

Existen diferentes sistemas de floculación por lo cual en este estudio se analizaron tres tipos: floculación química (sulfato de aluminio como floculante) en forma mecánica e hidráulica (FQM y FQH), la floculación microbiana (carbono orgánico como floculante) en forma hidráulica (FMcH).

**2.3.3. Selección del sistema de secado de microalgas.** Para el proceso de secado de microalgas se han encontrado por resultados preliminares en la literatura que muestran un alto contenido de sólidos obtenidos mediante el uso de métodos mecánicos, mostrando que este método puede después provocar un rompimiento en la pared celular degradando componentes importantes de la microalga [84]. No hay ningún conocimiento a nivel industrial de uso de secadores mecánicos para microalgas. Respecto a secado térmico, la energía es requerida principalmente como calor. Típicamente los secadores térmicos usan significativamente más energía por kilogramos de agua evaporada (3,3 – 3,9 MJ/kg) [85] que el calor latente de evaporación del agua (2.26 MJ/kg).

Nuevos conceptos de secado, como el secador de cinta (belt dryer), muestra un potencial enorme como una alternativa de secado porque tiene una alta eficiencia térmica es particularmente adecuado para la recuperación de calor a partir de fuentes de energía de residuos de baja temperatura. Sin embargo, el sistema de secado de cinta o banda se basa en el secado de productos a baja temperatura (entre 65 – 70 °C) en un túnel continuo, por lo que también es conocido como secado a baja temperatura.

El proceso es flexible y capaz de afrontar grandes cambios en la entrada del producto, gracias a la posibilidad de regular tanto la velocidad de la cinta y el proceso de la temperatura del aire. Este sistema está diseñado para el secado de lodos previamente deshidratados por métodos mecánicos. Por lo tanto para este estudio fue elegido este sistema de secado térmico belt dryer combinándolo con una deshidratación mecánica anterior a este por medio de una centrifuga.

**2.3.4. Selección del proceso de extracción de aceite de microalgas.** Después de obtener la biomasa seca, esta es sometida a un proceso de extracción para obtener el aceite. Actualmente en la literatura se ha encontrado gran variedad de métodos para la extracción de aceite de diferentes materias primas, sin embargo

para microalgas aún no se han desarrollado tecnologías de extracción de aceite a nivel industrial y no se reportan datos de condiciones de operación o equipos utilizados para el proceso. En estudios de ACV de producción de biodiesel a partir de microalgas este proceso lo realizan haciendo una aproximación a los sistemas de extracción de aceite provenientes de soja.

Para este estudio se tomó las condiciones óptimas de operación, procedimiento y relaciones biomasa-solvente arrojadas por pruebas experimentales que fueron realizadas dentro del Centro de investigación por el Laboratorio de Biomasa de la Universidad Industrial de Santander para los sistemas de extracción con solventes [50, 47, 86]. De acuerdo con lo anterior los métodos seleccionados para el análisis fueron: extracción Etanol-Hexano (EEH), Extracción Metanol-Cloroformo (EMC) y Extracción Hexano (EH).

**2.3.5. Selección del proceso de esterificación/transesterificación.** Diversos estudios se han reportado acerca de los factores que afectan las reacciones de transesterificación de aceites de origen vegetal [87]. Varios autores han realizado avances significativos en el estudio cinético de la reacción de transesterificación. Freedman et al. (1984) [88] fueron los pioneros en esta importante área para el desarrollo de los biocombustibles en la década de los 80. En su trabajo encontraron que las variables que afectan el rendimiento de la reacción de transesterificación son: la relación alcohol/aceite, tipo de catalizador (ácido o básico), temperatura de operación y grado de refinación del aceite utilizado. También encontraron que el uso de catalizadores básicos, temperaturas de operación iguales o superiores a 60°C, relaciones molares alcohol/aceite de al menos 6:1 y con aceites refinados se obtiene una conversión de alquilésteres prácticamente completa (97%) al cabo de una hora.

Los altos contenidos de Ácidos Grasos Libres (AGL) en el aceite de microalga lo pueden convertir en una opción inconveniente para la producción de biodiesel; sin embargo, esto puede reducirse por medio del desarrollo de una etapa de esterificación de los AGL con alcohol en presencia de catalizador ácido, previa a la etapa de transesterificación, de esta manera los alquil-ésteres de ácidos grasos y el agua pueden ser obtenidos y separados. Así, la transesterificación de triglicéridos con un alcohol ocurrirá de manera más rápida y con menos dificultades técnicas [89].

En este estudio para el proceso de obtención de biodiesel desde aceite de microalgas se seleccionó en dos reactores secuenciales de esterificación/transesterificación. Los principales factores que se tuvo en cuenta para la realización del proceso son: la relación molar alcohol/aceite, el tipo de catalizador, la temperatura y el contenido de agua y ácidos grasos libres en la microalga. Con base en la información anterior se asumió una conversión del 97% de los alquilésteres en la reacción de transesterificación bajo las mismas condiciones operacionales reportadas en la literatura científica.

## **2.4. DEFINICIÓN DE ESCENARIOS A EVALUAR**

A partir de los procesos unitarios o etapas más incidentes (recolección de biomasa y extracción de aceite) dentro de la cadena de producción de biodiesel a partir de microalgas se definen los siguientes escenarios que son estudiados en el Análisis de Ciclo de Vida, este análisis se desarrolla en dos fases, en la primera se compararon los tres procesos de recolección de biomasa que son Floculación Química Mecánica (FQM), Floculación Química Hidráulica (FQH) y Floculación Microbiana Hidráulica (FMcH). Los escenarios que comprenden la fase 1 son mostrados a continuación:

- **Escenario 1.** Producción de biodiesel a partir de microalgas que involucra las siguientes etapas: cultivo en estanques abiertos, cosecha por medio de floculación química con sistema mecánico (FQM), secado, extracción con hexano en relación másica solvente/biomasa de 33:1, esterificación-transesterificación del aceite y transporte - distribución.
- **Escenario 2:** Producción de biodiesel a partir de microalgas variando a partir del escenario 1 la etapa de cosecha por floculación química con sistema Hidráulico (FQH).
- **Escenario 3:** Producción de biodiesel a partir de microalgas variando a partir del escenario 1 la etapa de cosecha por floculación química microbiana (FMcH).

El mejor perfil ambiental obtenido en la fase 1 (seleccionando la tecnología de cosecha) sirve como caso base para el siguiente análisis de sensibilidad en la fase 2. En la segunda fase se compararon los sistemas de extracción basado en solventes con el caso base. Se han representado esquemáticamente en las figuras 11 y 12 todas las etapas principales de cada uno de los escenarios evaluados en la fase 1 y 2 de este estudio de ACV.

Los escenarios estudiados en el ACV que comprenden la fase 2 son:

- **Escenario base (escenario seleccionado en la fase 1).** Producción de biodiesel a partir de microalgas que involucra las siguientes etapas: cultivo en estanques abiertos, cosecha según los resultados en la fase 1, secado, extracción con hexano en una relación másica solvente/biomasa de 33:1, esterificación-transesterificación del aceite y transporte y distribución.

- **Escenario 4.** Producción de biodiesel a partir de microalgas variando a partir del escenario base la etapa de extracción basado en solventes con hexano en una relación másica solvente/biomasa de 20:1.
- **Escenario 5:** Producción de biodiesel a partir de microalgas variando a partir del escenario base la etapa de extracción basado en una mezcla de solventes etanol/hexano.

Figura 11. Esquemas de los límites de los sistemas considerados en la fase 1.

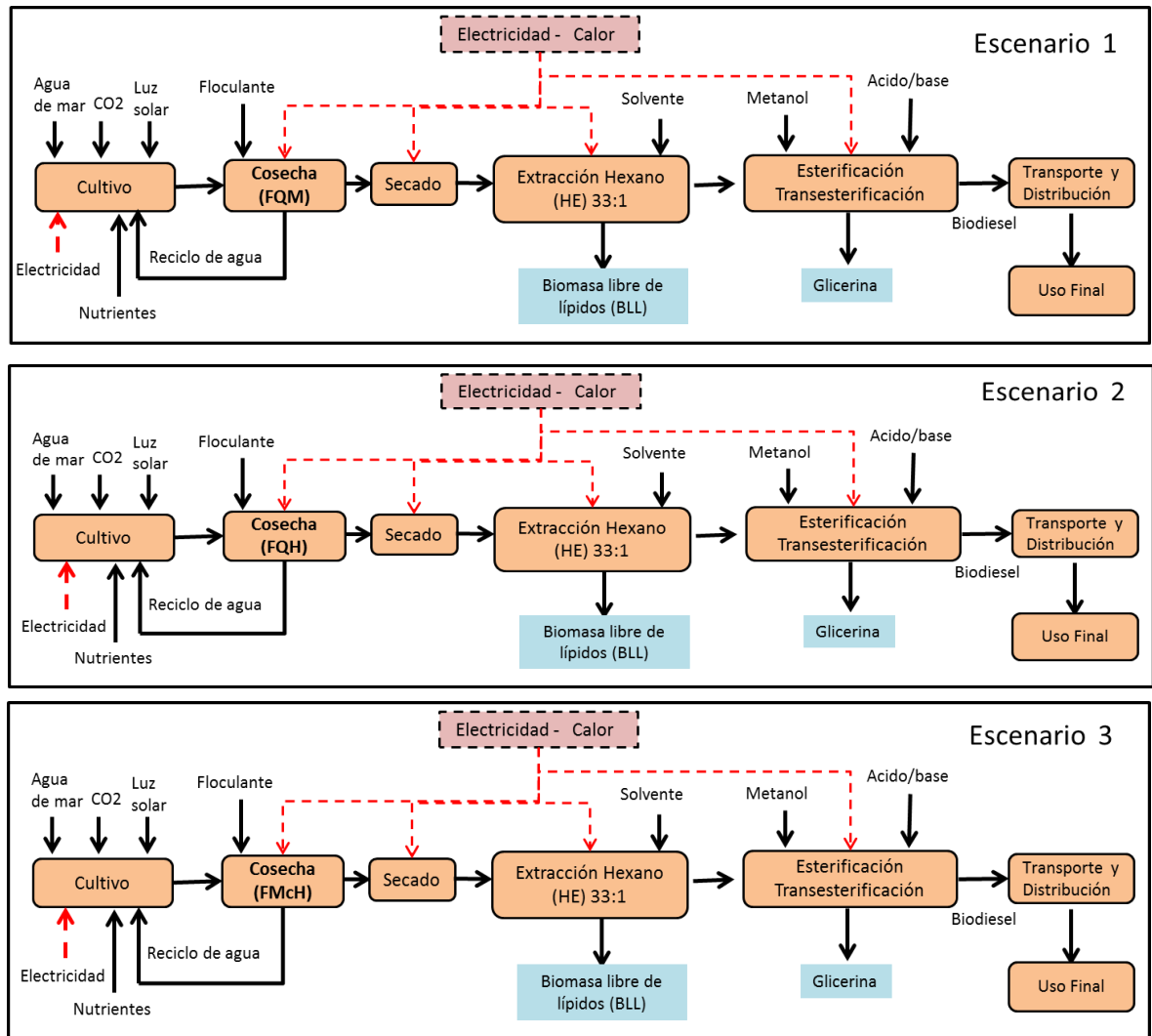
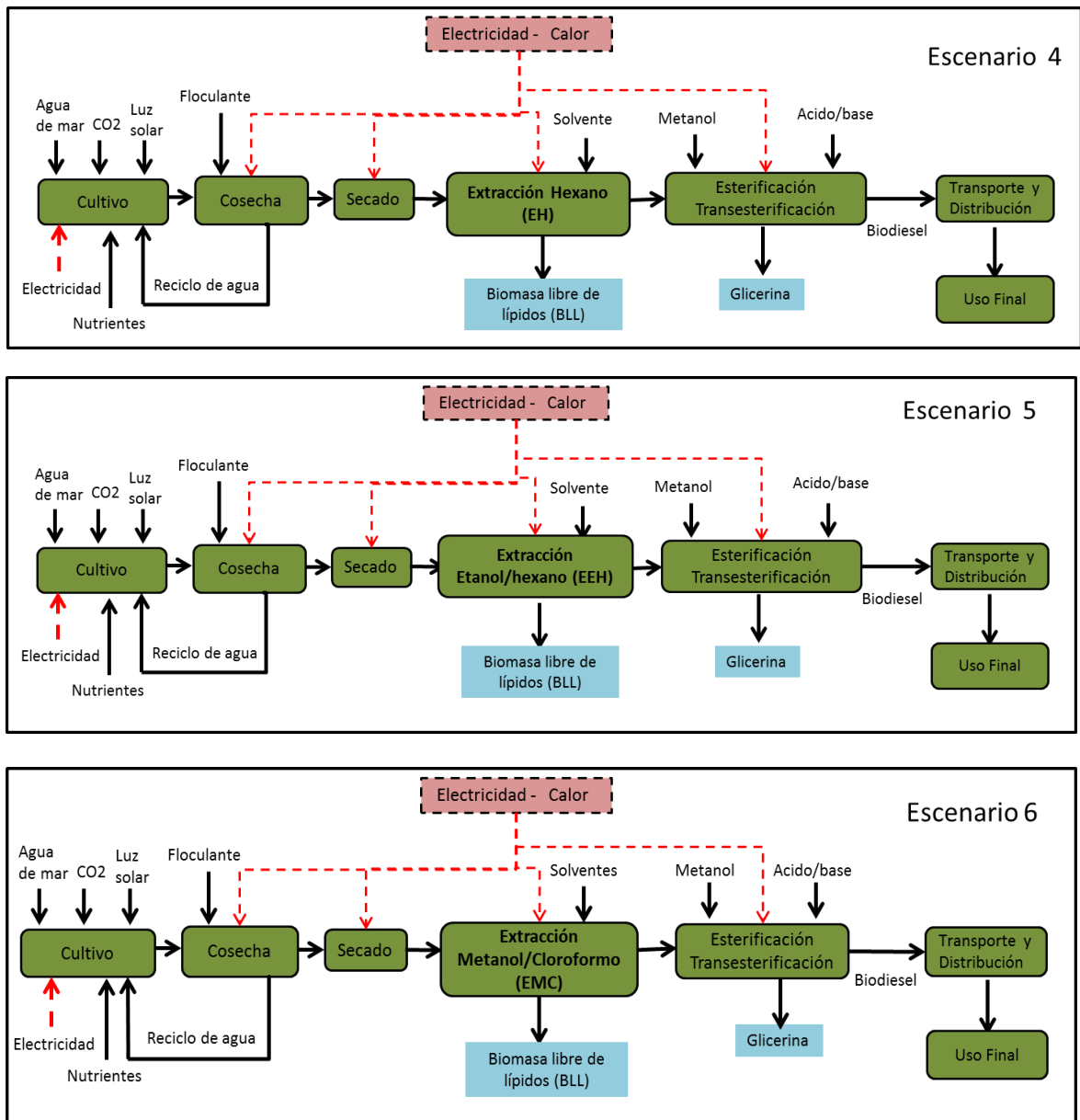


Figura 12. Esquemas de los límites de los sistemas considerados en la fase 2.



- **Escenario 6:** Producción de biodiesel a partir de microalgas variando a partir del escenario base la etapa de extracción basado en una mezcla de solventes metanol/cloroformo.

## 2.5 APLICACIÓN DE ANALISIS DE PROCESOS

Una vez seleccionada la especie de microalga, las tecnologías en cada etapa del proceso y de definir los escenarios a evaluar, se efectuó la identificación de las corrientes de entrada y salida, sus conexiones, reciclos y variables operacionales, aplicando análisis de procesos en algunos casos mediante simulación de procesos con el fin de definir los balances de materia y energía de todas las etapas de la producción de biodiesel a partir de microalgas.

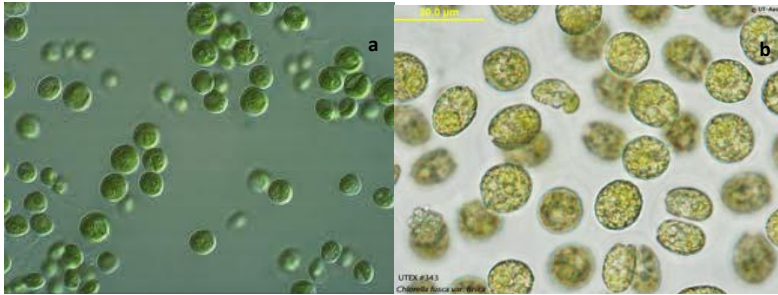
Para este análisis se determinó una capacidad de producción de 100 000 ton/año que se escogió de acuerdo a los datos reportados por la Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia para una planta productora de biodiesel llamada Biocombustibles Sostenibles del Caribe ubicada en la región Norte en Santa Marta, el cual tiene una capacidad de 100 000 ton/año.

En las etapas donde se implementó la simulación de procesos se realizaron utilizando como herramienta computacional el software Aspen Plus 7.1 [90] y en otras etapas se realizó haciendo uso de la herramienta informática Excel. En este apartado se desarrolla una descripción detallada de la composición de la microalga *Chlorella sp.* que será de suma importancia en la definición de componentes de la materia prima en la simulación de procesos.

**2.5.1. Descripción de la especie *Chlorella sp.*** La *Chlorella sp.* es un alga verde unicelular, esférica, con diámetro de 2-20  $\mu\text{m}$  que se puede reproducir en agua dulce o marina [61]. Las células están rodeadas de una pared delgada de celulosa, que contienen un núcleo que seco presenta la siguiente composición: 30% lípidos, 45% proteínas y 20% carbohidratos [91, 92]. Petkov y García (2007) [69] reportaron la composición de ácidos grasos para tres especies de *Chlorella*. Con el objetivo de obtener un diseño de proceso basado en un modelo más detallado para la microalga, se asumió un perfil lipídico basado en estos

resultados reportados, tomando el perfil de ácidos grasos de la especie *Chlorella* sp., esta composición se normalizó para incluir triglicéridos.

Figura 13. Imágenes de dos especies de *Chlorella*: a. *Chlorella vulgaris*. b. *Chlorella fusca*



Razón de crecimiento: 28 -30 g/m<sup>2</sup>/día  
 Temperatura: 35-37 °C (dependiendo de la especie)  
 pH: depende de la especie

En la composición de la biomasa se asumió un porcentaje de aceite del 30% en peso seco [33, 93], que corresponde a un 5,11% de ácidos grasos libres (AGL) y 94,89% de triglicéridos (TG) [94]. El contenido de proteína fue asumida en un valor de 40,05% [91, 92]; para los carbohidratos la literatura reporta aproximadamente un 25%, que incluye carbohidratos tales como almidón, celulosa y hemicelulosa [95]. Finalmente, el porcentaje de humedad se consideró como un 5,03% [92]. En el tabla 8, se muestra la composición en peso seco de la biomasa normalizada y modelada en este estudio.

Tabla 8. Modelo de la especie de microalga *Chlorella* sp. (% en peso seco).

*Ácidos grasos libres (AGL)	Triglicéridos (TG)	**Aminoácidos	***Carbohidratos	Agua					
Ácido Myristico	0,14	TG C14:0	2,56	Acido aspártico	4,49	Celulosa	13,33	Agua	5,03
Ácido Palmítico	0,38	TG C16-0	7,15	Acido glutámico	5,47	Almidón	7,75		
Ácido Palmitoleico	0,03	TG C16-1	0,57	Glycine	4,35	Hemicelulosa	3,84		
Ácido Hexadecadienoico	0,15	TG C16-2	2,85	Alanine	5,40	<b>Total</b>	24,92		
Ácido Hexadecatrienoico	0,14	TG C16-3	2,56	Valine	3,86				
Ácido Estearico	0,01	TG C18-0	0,26	Leucine	4,28				
Ácido Oleico	0,08	TG C18-1	1,42	Proline	5,05				
Ácido Linoleico	0,31	TG C18-2	5,69	Lysine	7,15				
Ácido Linolenico	0,29	TG C18-3	5,41	<b>Total</b>	40,05				
<b>Total</b>	1,53	<b>Total</b>	28,47						

\* Petkov and Garcia 2007. Which are fatty acids of the green alga Chlorella?

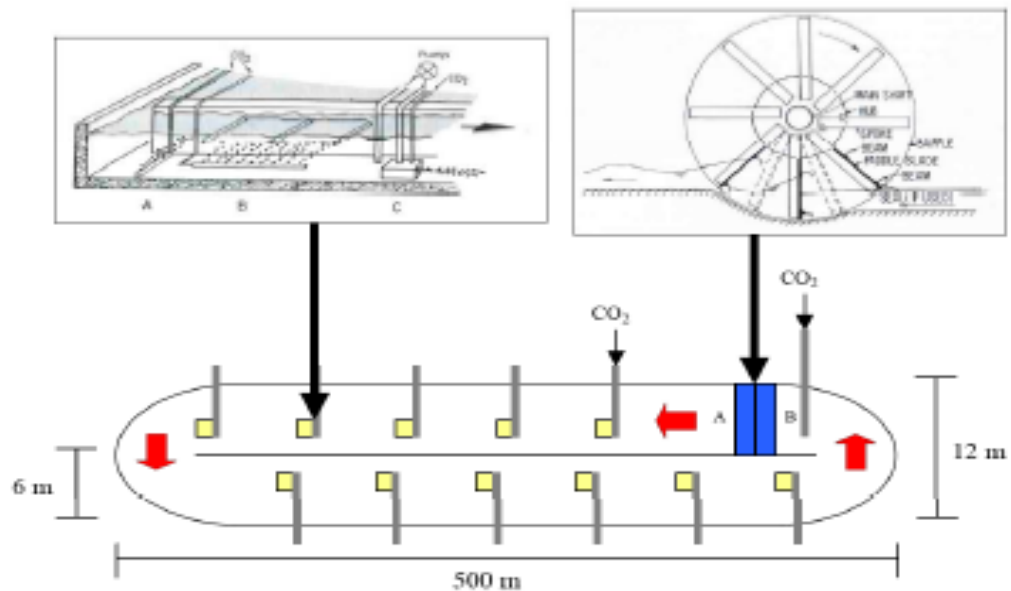
\*\* Fowden 1951. The composition of the Bulk Proteins of Chlorella.

\*\*\* Ververis et al. 2007. Cellulose, hemicelluloses, lignin and ash content of some organic materials and their suitability for use as paper pulp supplements.

**2.5.2. Tecnología de cultivo de microalgas.** Para dar comienzo al cultivo de microalgas, la cepa de microalgas debe ser cultivada previamente para preparar el inóculo. El inóculo ya preparado se utilizará como un cultivo de siembra para los estanques abiertos.

Los estanques abiertos, basados en el diseño estándar de Borowitzka and Borowitzka (1988) [18], consisten en una canalización revestida y poco profunda, en el que el agua que contiene algas se distribuye por ruedas de paletas (paddlewheel) como se muestra en la figura 14 (ver anexo A). Apoyado en los resultados de Li, Y. et al. (2006) [96] se tomaron parámetros de diseño como se muestra en la tabla 9 para la implementación del diseño de los estanques abiertos en este estudio.

**Figura 14. Diseño del estanque abierto para cultivo de microalgas [96].**



**Tabla 9. Parámetros de diseño para un estanque de cultivo de algas. [96]**

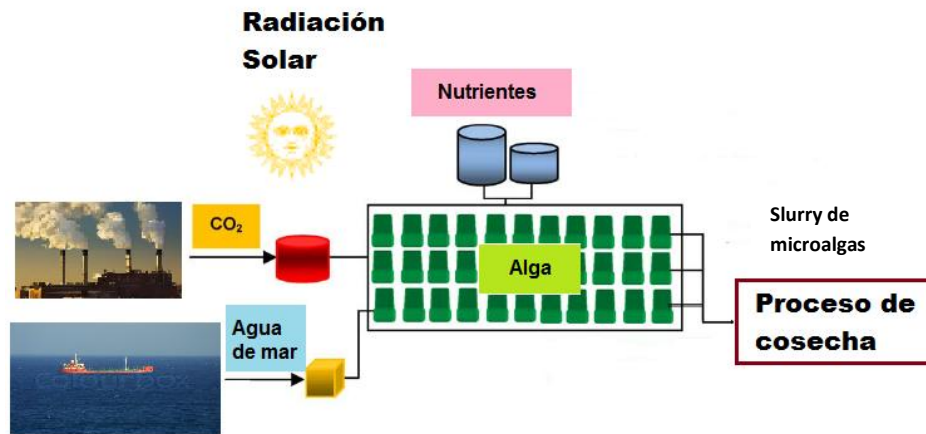
Parámetro	Cantidad	Descripción
Tipo de estanque	Estanque (receway)	Sistema de estanque más preferido utilizado en plantas comerciales <sup>1,3</sup>
Método de mezclado	Rueda de paletas (Paddlewheel)	Se utiliza en estanques de algas más comerciales. Parámetros de mezcla muy bien conocidos. <sup>1,3</sup> La Rueda de paletas se utilizó en este estudio de 6 m x 1,8 m. <sup>2</sup> La rueda de paletas se supone una eficiencia del 50%.
Suministro de CO <sub>2</sub> al estanque	Entrada de CO <sub>2</sub> por difusión	El método más eficaz para los sistemas de estanques. Metal poroso o tubo de plástico podría ser usado. <sup>1</sup>
Velocidad de mezclado	30 cm/s	Obtenido experimentalmente y usado en varios recursos. <sup>1,2,3</sup>
Profundidad del estanque (d)	30 cm	Obtenido experimentalmente y usado en varios recursos. <sup>1,2,3</sup>
Cambio en profundidad ( $\Delta d$ )	7,5 cm	Pendiente Ligera en el estanque, aumentará la eficiencia de la agitación en el estanque. <sup>1,2,3</sup>
Ancho del canal	6 m	Este valor depende del tamaño de la rueda de paletas que pueda ser usado <sup>1,2,3</sup>
Ancho del estanque	12 m	2 x 6 ofrece un ancho de estanque de 12 m.
Longitud del estanque	500 m	Este valor fue escogido para construir un estanque de un tamaño relativo (valor no calculado)
Área del estanque	5969 m <sup>2</sup>	Calculado
Productividad del alga	30 g/m <sup>2</sup> día	En peso seco

1. Becker, E. W., Microalgae: Biotechnology and microbiology, Cambridge Univeristy Press, 1994, USA.  
 2. Borowitzka, M. A.; Borowitzka, L. J., Micro-algae biotechnology, Cambridge University Press, 1988, UK.  
 3. Richmond, A., Handbook of microalgal mass culture, 1986, CRC Press, USA.

Las corrientes de entrada que requiere el sistema de cultivo para su crecimiento son: nutrientes, agua, CO<sub>2</sub> y luz solar como se muestra en la figura 15. El agua de mar en este estudio fue usada y bombeada directamente desde el mar hacia el cultivo de algas, tiene la ventaja de que muy pocos nutrientes se añaden al agua para el crecimiento óptimo. Estudios realizados por Yang et al. (2010) [97],

muestran que usando agua de mar para el cultivo de algas, se puede reducir el uso de nitrógeno en un 94% y en un 55% el uso de fosfato eliminando la necesidad de potasio, magnesio y sulfuro. Se asumió que el nitrógeno puede ser suministrado como urea y el fosfato como triplesuperfosfato.

Figura 15. Flujos de entrada y salida del sistema de cultivo.



La corriente de entrada de gas es inyectada como  $\text{CO}_2$  (figura 15) donde en la literatura se ha determinado experimentalmente que aproximadamente para 1 gramo de biomasa producida 1,83 g de  $\text{CO}_2$  es necesario. Los requerimientos de  $\text{CO}_2$  y nitrógeno fueron estimados usando la composición elemental de la especie de microalga *Chlorella sp.* [98]: 47.54% de C, 7.1% de H, 38.83% de O y 6.73% de N, a partir de esto la cantidad de  $\text{CO}_2$  y urea que se ingresaron al sistema fue de 1.7424 kg  $\text{CO}_2$ /kg alga seca y 0.1502 kg  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ /kg alga seca, por otro lado, se asumió que la microalga captura el 80% de  $\text{CO}_2$  [90]. A partir de datos reportados por Handler R. *et al.* (2012) [100] se estimó el ingreso de fosfato al cultivo de microalgas en un valor de 0,00212 kg  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ /kg alga seca. El consumo de energía por inyección de la corriente de gas es evaluado por Kadam (2002) [101] en 22.2Wh por kilogramo de  $\text{CO}_2$ .

En términos de aplicación comercial, el reciclo de agua desde el sistema de cosecha al cultivo puede reducir el costo de los nutrientes y evitar problemas ambientales que surgen con la descarga de grandes volúmenes de agua rica en nutrientes a la tierra [102].

Una corriente de entrada de agua se necesita para remplazar las pérdidas de agua por evaporación, para esto se tomó un promedio de 1,0098 kg /m<sup>2</sup> día de agua evaporada obtenido de los reportes de la climatología de la Región Caribe Colombiana (Barranquilla) [103]. La parte del cultivo (slurry de microalgas) que es cosechada posteriormente se realiza sobre una base diaria, que generalmente es en un intervalo del 25 al 33 % del volumen total del estanque [102]. En este estudio se asume que el 33% es enviado a la etapa de cosecha y el otro restante se queda como medio de cultivo en los estanques sirviendo como inóculo.

Andersen R. [104] reportó que en estanques bien mezclados generalmente producen biomasa de algas en concentraciones de hasta 1 kg (biomasa seca)/m<sup>3</sup>. La concentración final de biomasa obtenida en la etapa cultivo se tomó por lo tanto de 1 kg/m<sup>3</sup>. Para este análisis se usó una productividad por área de 30 g/m<sup>2</sup>\*día y un tiempo de residencia de las microalgas en los estanques de 10 días. El agua es agitada por medio de rueda de paletas (paddlewheel) a una velocidad de 0,30 m/s. El requerimiento de energía hidráulica para el mezclado de los estanques fue estimado desde las pérdidas de cabeza, dimensiones del canal y la velocidad del agua. Por tanto, la potencia requerida es [102, 105]:

$$P = \frac{\rho Q \Delta d}{102 e} \quad (1)$$

Donde P = potencia (kW), Q = velocidad de flujo de agua (m<sup>3</sup>/s), ρ = densidad de agua (kg/m<sup>3</sup>), e = eficiencia de 0,5 del paddlewheel y Δd = cambio en profundidad

(m); 102 es el factor de conversión requerido para convertir  $m^3 \cdot kg/s$  a kW. Para un estanque con sección transversal rectangular:

$$Q = w \times v \times d \quad (2)$$

Donde  $w$  = ancho del canal,  $d$  = profundo y  $v$  = velocidad del agua [102]. A partir de los parámetros de diseño mostrados en la tabla 9 y remplazando los datos y tomando una densidad de agua de mar de  $1027 \text{ kg/m}^3$ , se obtiene un valor para potencia hidráulica de  $P = 0,815 \text{ kW}$ .

La superficie necesaria para producir la cantidad de biomasa por unidad funcional fue estimada a partir de los datos de diseño y datos operacionales expuestos anteriormente donde la superficie por un estanque es de 0,6 ha y para la producción total de biomasa al día son 35 ha en los cuales se usó 58 estanques del mismo tamaño.

De acuerdo con la descripción anterior en la tabla 10 se muestra los flujos de entrada y salida para el sistema de cultivo de microalgas que han sido normalizados a 1 ton de biodiesel. Para la cuantificación de las entradas y salidas de la etapa de cultivo se tuvo en cuenta las corrientes de reciclo.

**Tabla 10. Principales flujos de masa y energía para el sistema de cultivo de microalgas.**

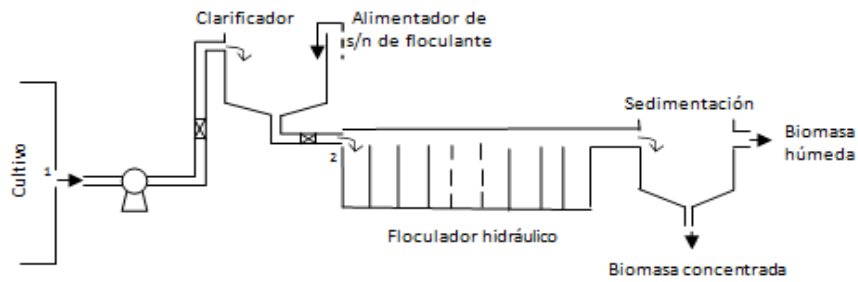
Componente	Cantidad	unidad
<b>Flujos de entrada</b>		
CO <sub>2</sub>	6,052	t
N (como urea)	0,0937	t
P (triple superfosfato)	0,0099	t
Agua de mar fresca	62,65	t
Energía por sistema de bombeo de agua	303,89	kW-h
Energía por inyección de CO <sub>2</sub>	132,82	kW-h

Componente	Cantidad	unidad
Energía por agitación del cultivo (Paddle Wheel)	1131,49	kW-h
Energía por mezcla (nutrientes)	2,108	kW-h
<b>Flujos de salida</b>		
Algas (slurry)	3,433	t
Agua (slurry)	3523,44	t
CO <sub>2</sub> emitido	1,210	t
Agua evaporada	34,44	t

**2.5.3. Tecnología de cosecha o recolección de biomasa de microalgas.** Una vez obtenido el slurry de microalgas del sistema de cultivo el objeto siguiente es recolectar la biomasa retirando la mayor cantidad de agua. Con las tecnologías seleccionadas en el apartado anterior se procede a realizar la cuantificación de las entradas y salidas de este sistema para esto, en primer lugar, se cuantificaran las entradas y salidas de los sistemas de FQH y FQM que son dos sistemas que tienen el mismo floculante (sulfato de aluminio) pero diferente forma de floculación (hidráulica y mecánica) y en segundo lugar, se analizará la FMcH que es un sistema que emplea como floculante carbono orgánico (anilina).

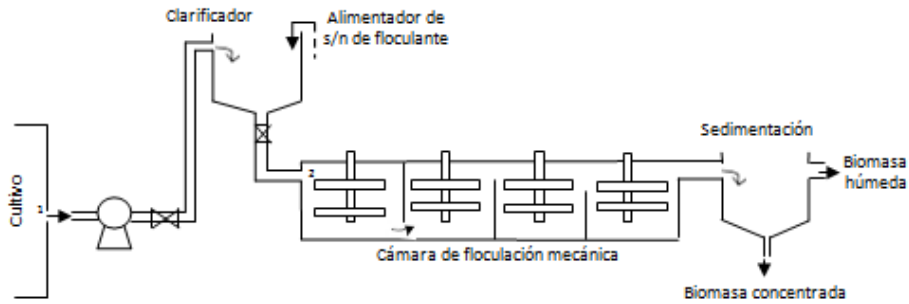
Los sistemas de FQH y FQM están compuestos por dos tanques clarificadores y un tanque de floculación como se muestra en las figuras 16 y 17. En uno de los clarificadores se llevará a cabo el proceso de coagulación (adición del floculante) y en el otro se sedimentaran los flóculos para posteriormente ser recuperados como biomasa concentrada que es el producto final (10% solidos secos) y biomasa húmeda que es la corriente recirculada al cultivo. Se asumió una pérdida de solidos del 1% en peso en el proceso [106].

**Figura 16. Vista lateral del sistema de cosecha para floculación química hidráulica.**



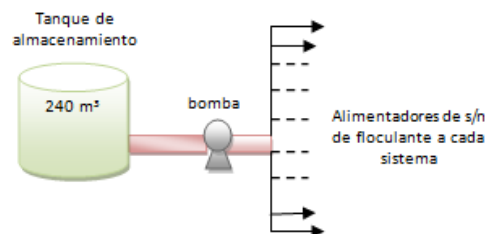
Se asumió para el sistema de floculación una eficiencia del 90% y para la bomba y el motor de la bomba una eficiencia del 80% [107]. Basado en datos obtenidos por Peralta et al. (2012) [108] se tomó parámetros de diseño para los sistemas de cosecha FQH y FQM como se muestra en la tabla 11.

**Figura 17. Vista lateral del sistema de cosecha para floculación química mecánica.**



El floculante se adicionó como sulfato de aluminio en una concentración de 0,05 g/l [109], diluidos en agua al 20% en peso, mediante un sistema de bombeo (Bomba centrífuga rotodinámicas con una potencia de 1HP) desde un tanque de 240 m<sup>3</sup> como se muestra en la figura 18.

**Figura 18. Sistema de adición del floculante.**



**Tabla 11. Parámetros de diseño de los sistemas de FQH y FQM.**

Parámetro	FQH	FQM	Unidad
Gradiente de velocidad de floculación. <sup>1</sup>	70	70	s <sup>-1</sup>
Viscosidad ( $\mu$ )	1.31x10 <sup>-3</sup>	1.31x10 <sup>-3</sup>	Pa*s
Tiempo de floculación. <sup>2</sup>	25	25	min
Numero de compartimientos		4 en serie	
Velocidad de flujo. <sup>3</sup>	0.3	0.75	m/s
<b>Dimensiones del floculador</b>			
Largo <sup>2,4</sup>	21	5	m
Ancho <sup>2,4</sup>	8	5.08	m
Profundidad <sup>2,4</sup>	4	5	m
Volumen <sup>2,4</sup>	672	508	m <sup>3</sup>
Volumen del tanque clarificador <sup>4</sup>	461	151	m <sup>3</sup>
Volumen del tanque de sedimentación. <sup>4</sup>	461	373	m <sup>3</sup>

1. Yusuf Chisti., Biodiesel from microalgae. Journal of Biotechnology Advances. 2007; 25:294-306.

2. ENOHSa ENTE NACIONAL DE OBRAS HÍDRICAS DE SANEAMIENTO. Floculación (Cap.VII). <[http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/materias/ing\\_sanitaria/ENOHSa%20Floculacion.pdf](http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/materias/ing_sanitaria/ENOHSa%20Floculacion.pdf)>.

3. Anna L. Stephenson, Elena Kazamia,, John S. Dennis, Christopher J. Howe, Stuart A. Scott, and Alison G. Smith. Life-Cycle Assessment of Potential Algal Biodiesel Production in the United Kingdom: A Comparison of Raceways and Air-Lift Tubular Bioreactors. Journal of Energy Fuels. 2010; 24 (7):4062–4077.

4. Andrew K. Lee, David M. Lewis, Peter J. Ashman,. Energy requirements and economic analysis of a full-scale microbial flocculation system for microalgae harvesting. Journal of Chemical Engineering Research and Design. 2010; 88 (8):988-996

Como se aprecia en la figura 16 para un sistema de FQH, los flóculos de biomasa formados serán sedimentados y retirados por la parte inferior del tanque clarificador mediante un filtro a un flujo de 0.53 m<sup>3</sup>/s, y el agua de recirculación es retirada por la parte superior del tanque de sedimentación a la velocidad de flujo del proceso, necesitándose un área de salida de 1.42 m<sup>2</sup>.

La energía necesaria para llevar a cabo el proceso de cosecha de FQM, se compone básicamente por la potencia requerida por la bomba y la energía consumida por el sistema de agitación en la cámara de floculación:

Para el cálculo de la potencia requerida por la bomba se usó la siguiente ecuación:

$$P = Q\rho gH_B \quad (3)$$

Donde Q = caudal,  $\rho$  = densidad del agua,  $g$  = gravedad y  $H_B$  = las pérdidas de carga total o cabeza de la bomba [110]. Las pérdidas de energía para el sistema de FQM están dadas por tuberías y accesorios [111] las cuales fueron halladas. La potencia requerida por el sistema de agitación se calculó a partir de [109]:

$$P = G^2\mu V \quad (4)$$

Donde G es el gradiente de velocidad,  $\mu$  es la viscosidad y V es el volumen total del sistema.

Para el cálculo de la energía requerida de la bomba en el sistema de FQH se usó la ecuación 3, donde las pérdidas de carga total es la suma de dos parciales, una debida a la fricción en el canal, y la principal debida a los cambios de dirección, las pérdidas por tubería y accesorios en estos sistemas pueden ser despreciables [109].

Las pérdidas de carga debido a la fricción en los canales se estimaron de la siguiente manera [110]:

$$h_{l1*} = L \left( \frac{v*f}{R_H} \right)^2 \quad (5)$$

Donde  $L$  es la longitud total de los canales,  $v$  es la velocidad de floculación,  $R_H$  es el radio hidráulico y  $f$  es el coeficiente de fricción de Manning, ( $f = 0.019$ ) [109]. Para determinar  $R_H$  se usó la ecuación siguiente [40]:

$$R_H = \frac{dw_c}{2d+w_c} \quad (6)$$

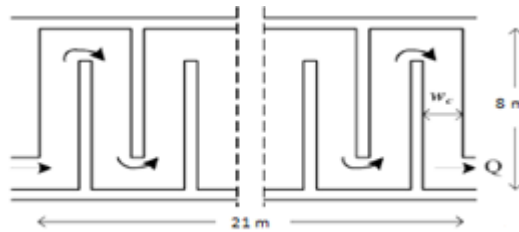
Donde  $w_c$  es la distancia entre canales y  $d$  es la profundidad del canal. La distancia entre canales y el número de canales fue calculada a partir de las siguientes ecuaciones [110]:

$$w_c = \frac{\text{longitud del floculador}}{\text{numero de canales}} \quad (7)$$

$$\# \text{ canales} = \frac{\text{volumen del floculador} * \text{velocidad de mezcla}}{\text{caudal por hora} * \text{ancho del estanque}} \quad (8)$$

En la figura 19 se muestra la vista superior del tanque del floculador hidráulico. La energía requerida por el sistema de filtración asumida dentro de este estudio es de  $5 \text{ kW-h/m}^3$  [106].

**Figura 19. Vista superior del tanque de floculador hidráulico.**



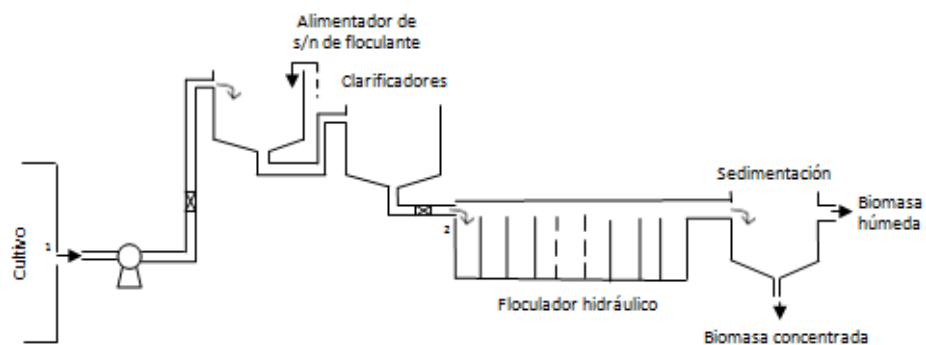
Las pérdidas de carga debido a los cambios de dirección se calcularon de la siguiente forma [109]:

$$h_{l2*} = n \left( \frac{v^2 N_l}{2g} \right) \quad (9)$$

Donde  $n$  es el número de curvas,  $v$  es la velocidad de flujo,  $g$  es la constante gravitacional y  $N_l$  es el coeficiente de pérdida debido a las curvas de retorno (para  $Re = 1.66 \times 10^5$ , el valor  $N_l$  es de  $\approx 3,2$ ) [112].

Como tercer sistema de cosecha esta floculación microbiana agitación hidráulica (FMCH), el que se compone de tres tanques clarificadores y una cámara de floculación como se muestra en la figura 20.

**Figura 20. Vista lateral del sistema de floculación microbiana-hidráulica.**



Se asumió las mismas eficiencias para el sistema de floculación, la bomba y el motor de la bomba que los sistemas de cosecha expuestos anteriormente. Basado en datos reportados por Peralta et al. (2012) [108] se tomó parámetros de diseño que son mostrados en la tabla 12.

**Tabla 12. Parámetros de diseño de los sistemas de FMCH.**

Parámetro	FMCH	Unidad
Gradiente de velocidad de floculación. <sup>1</sup>	70	s <sup>-1</sup>
Tiempo de mezclado. <sup>2</sup>	< 24	h
Velocidad de mezclado. <sup>3</sup>	0.3	m/s
<b>Dimensiones del floculador</b>		

Parámetro	FMcH	Unidad
Largo <sup>3</sup>	80	m
Ancho <sup>3</sup>	35	m
Profundidad <sup>3</sup>	4	m
Volumen	11200	m <sup>3</sup>
Volumen de los tanques clarificadores	10446	m <sup>3</sup>

1. Yusuf Chisti, Biodiesel from microalgae. *Journal of Biotechnology Advances*. 2007; 25:294-306.
2. Lee, A., Lewis, D. and Ashman, P., Microbial flocculation, a potentially low-cost harvesting technique for marine microalgae for the production of biodiesel. *Journal of Applied Phycology*. 2009; 21: 559–567.
3. Andrew K. Lee, David M. Lewis, Peter J. Ashman, Energy requirements and economic analysis of a full-scale microbial flocculation system for microalgae harvesting. *Journal of Chemical Engineering Research and Design*. 2010; 88 (8):988-996.

Los flóculos de biomasa formados serán sedimentados y retirados por la parte inferior del tanque clarificador a un flujo de  $0.53 \text{ m}^3/\text{s}$ , y el agua de recirculación se retirara por la parte superior del tanque de sedimentación a la velocidad de flujo del proceso, necesitándose un área de salida de  $4.85 \text{ m}^2$ .

El floculante se adicionó en forma de anilina en una concentración de  $0.1 \text{ g/l}$  [109], diluidos en agua con un porcentaje en peso del 20% y será suministrado para todo el sistema por un sistema bombeo (Bomba centrífuga rotodinámicas con una potencia de 2HP) desde un tanque de  $540 \text{ m}^3$ , la energía requerida para el suministro del floculante es despreciable comparada con la requerida por las demás partes del sistema.

Para el cálculo de la energía requerida de la bomba en el sistema de FMcH se usó las ecuaciones empleadas en el sistema de FQH, donde las pérdidas de carga total es la suma de dos parciales, una debida a la fricción en el canal, y la principal debida a los cambios de dirección.

En la tabla 13 se muestra los flujos de entrada y salida para el sistema de recolección de biomasa de microalgas que han sido normalizados a 1 ton de biodiesel.

**2.5.4. Tecnología de secado de microalgas.** Después de retirar en gran cantidad el agua de la biomasa de algas, el siguiente paso es aplicar un secado para así obtener una biomasa con un 5 % de humedad, porcentaje permisible para poder realizar la extracción de aceite de la biomasa de microalgas. Para esto como se mencionó en el apartado 2.3.3, se usó un método de deshidratación mecánica seguido por un método térmico.

La tecnología de Evodos de una centrifuga tipo 10 de placas espiral para la separación de microalgas, se basa en la fuerza centrífuga, sin embargo, la rotación es a una velocidad mucho más baja que centrifugadoras de placa convencional. Tanto la dinámica de fluido y la dinámica mecánica son completamente diferentes de maquinaria convencional.

**Tabla 13. Flujos de masa y energía para los sistemas de cosecha de microalgas.**

<b>Componente</b>	<b>FQH</b>	<b>FQM</b>	<b>FMcH</b>	<b>Unidad</b>
<b>Flujos de entrada</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Cantidad</b>	
Algas	3,433	3,433	3,433	t
Agua	3523,44	3523,44	3523,44	t
Floculante	0,190	0,190	0,3801	t
Energía por sistema de bombeo	74,67	76,20	311,4	kW-h
Energía consumida por el filtro	135,41	135,41	135,41	kW-h
Energía por agitación	-	9,184	-	kW-h
<b>Flujos de salida</b>				
Algas (slurry)	3,090	3,090	3,090	t
Agua (slurry)	27,81	27,81	27,81	t
Agua evaporada	0,397	0,397	0,397	t
Pérdida de solidos	0,0034	0,0034	0,0034	t

Componente	FQH	FQM	FMcH	Unidad
Algas recirculadas al cultivo	0,3396	0,3396	0,3396	t
Agua recirculada al cultivo	3495,23	3495,23	3495,23	t

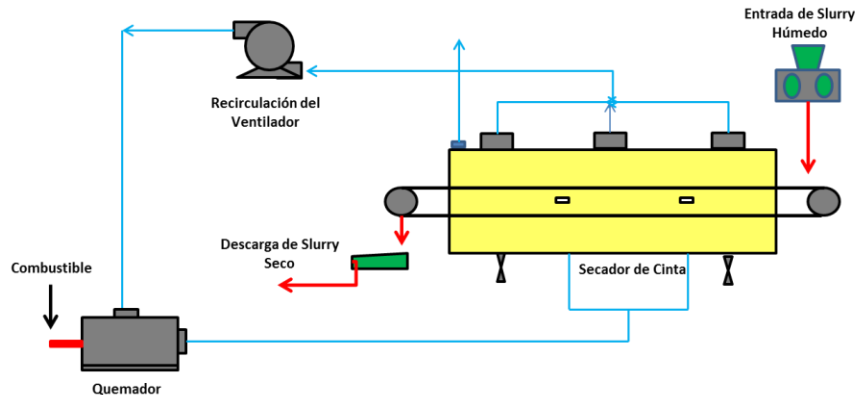
De acuerdo con Evodos, un recuento de partículas en el flujo de alimentación y en el flujo de descarga, muestran que se cosecha más de un 95% de las algas. El contenido sólido seco de las algas producidas es aproximadamente 31,5%. La evaluación microscópica muestra que no hay daño térmico para las algas. A partir de esto, en este estudio se asumió 31,5% de sólidos secos producidos.

Funcionando con una fuerza en el orden de 3000 veces que la gravedad, la demanda de energía del sistema es 1,3 kWh/m<sup>3</sup> de flujo de alimentación incluyendo la bomba, muy por debajo de la demanda de energía de la pila de discos de alta velocidad de centrifugas<sup>10</sup>.

El secado térmico es un proceso para la reducción del volumen de agua en productos sólidos, mediante la eliminación de la humedad y la obtención de sólidos secos en una concentración por encima del 90%. El secador de cinta es un secador convectivo y se basa en el secado de productos a baja temperatura (entre 65 – 70 °C) en un túnel continuo, por lo que también es conocido como secado a baja temperatura, este es mostrado en la figura 21. La cinta transportadora, de construcción especial, recorre el túnel cargada de producto donde se distribuye uniformemente sobre el ancho de la banda para causar una evaporación uniforme, a través del cual circula aire caliente y seco verticalmente a dicha cinta, extrayendo el exceso de humedad. La descarga de lodo se realiza con ayuda de unos cepillos que descargan el lodo seco en el sistema de recogida.

<sup>10</sup> <http://www.algaeindustrymagazine.com/evodos-algae-dewatering-systems/>

**Figura 21. Sistema de secado de cinta.**



El sistema, caracterizado por su baja temperatura de trabajo, permite un mejor aprovechamiento energético, al trabajar con energías de menor nivel energético. Puede aprovechar así un mayor rango de temperaturas entre el fluido primario y el sistema de secado.

El calor para el secado se obtiene del circuito de agua caliente. El calor del agua es intercambiado, obteniendo aire caliente, que se utiliza para calentar el producto y evaporar el agua que contiene. Dependiendo de las condiciones atmosféricas (humedad y temperatura), una parte del aire puede ser recirculada. Este modo de operación da lugar a una disminución considerable de los costes energéticos. El requerimiento de calor es alrededor de 800 kcal/kg de agua evaporada, el requerimiento de energía eléctrica es alrededor de 0,1 - 0,17 kW-h/l de agua evaporada y la capacidad de evaporar es alrededor de 500 – 6000 kg/h de agua [113]. En este estudio se asumió una salida en 5 % de humedad en peso seco [92].

En la tabla 14 se muestra los flujos de entrada y salida para el sistema de secado de biomasa de microalgas que han sido normalizados a 1 ton de biodiesel, asumiendo una recirculación del 50% del agua evaporada para el sistema térmico.

**Tabla 14. Flujos de masa y energía para el sistema de secado de microalgas.**

Componente	Cantidad	Unidad
<b>Flujos de entrada</b>		
Algas (slurry)	30,90	t
Calor (belt dryer)	11004,39	MJ
Electricidad (belt dryer)	543,42	kW-h
Electricidad (Centrifuga)	352,07	kW-h
<b>Flujos de salida</b>		
Algas (slurry)	3,090	t
Agua evaporada (belt dryer)	3,28	t
Agua salida de la centrifuga	21,093	t

De acuerdo a la tabla 14 se puede observar que de la cantidad de agua evaporada que sale del proceso de secado es el 50% del agua que ingresa ya que la cantidad restante es recirculada nuevamente al sistema.

**2.5.5. Tecnología de extracción de aceite de microalgas.** De acuerdo con la sección anterior los métodos seleccionados para el análisis fueron: Etanol-Hexano (EEH), Metanol-Cloroformo (EMC) y Hexano (EH). Cada una de los métodos seleccionados en la etapa de extracción de aceite se simuló mediante el Software Aspen Plus 7.1 [90]. El balance de masa y energía para cada proceso de extracción se determinó por medio de los flujos obtenidos por las simulaciones realizadas.

Se tomaron las condiciones óptimas de operación y relaciones biomasa-solvente arrojadas por el trabajo realizado en el Laboratorio de Biomasa de la Universidad Industrial de Santander para las rutas de extracción de aceite. A partir de la descripción de la especie *Chlorella sp* y de la composición de la microalga mostrada en la tabla 8 esta se compone por ácidos grasos, triglicéridos, carbohidratos y proteínas. La mayoría de estos compuestos se encontraron en la

librería de Aspen Plus 7.1, aquellos que no, se crearon y para esto se dibujó la estructura de cada compuesto en el software Chem 4- D Demos y se le determinó las propiedades termodinámicas en Aspen Plus. Algunas propiedades conocidas fueron introducidas, tales como: punto normal de ebullición, peso molecular y propiedades críticas. Los coeficientes de interacción binaria no disponibles en la librería del software fueron estimados con el método UNIFAC (Universal Functional Group Activity Coefficient) y la base de datos Thermo Data Engine (TDE).

De esta manera se logró simular un aceite de microalgas con nueve triglicéridos diferentes, nueve ácidos grasos libres y por lo tanto un biodiesel con nueve alquilésteres diferentes, lo cual mejora los perfiles composicionales que han sido reportados en la literatura científica en anteriores diseños teóricos en los cuales se ha usado en el mejor de los casos hasta cuatro triglicéridos para representar un aceite en la producción de biodiesel [114].

Se asumió que las tres cadenas carbonadas del TG eran provenientes del mismo AGL como se mencionó anteriormente. Esta consideración se realizó con el fin de disminuir considerablemente la cantidad de combinaciones que podrían aparecer en el momento de la creación de una molécula de TG a partir de tres cadenas de AGL [115, 116].

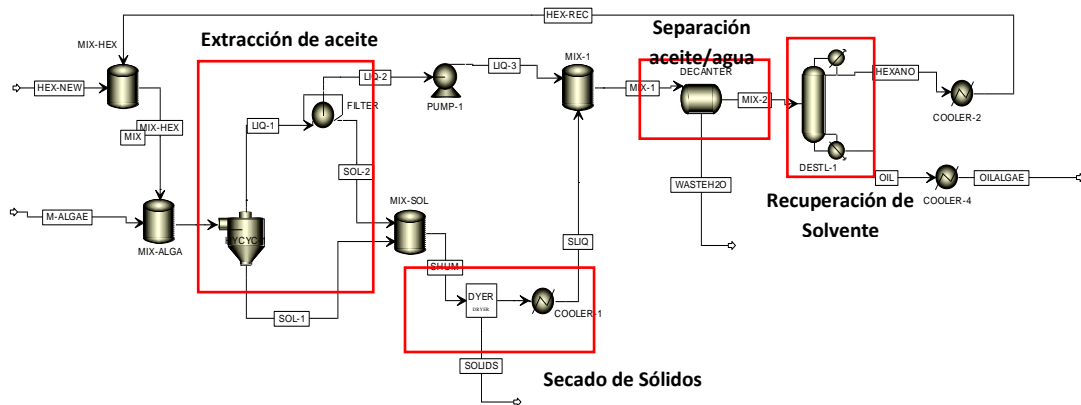
El modelo termodinámico utilizado para simular las rutas tecnológicas de extracción de aceite fue NRTL (Non-Random two liquids) y and RK-Soave, debido a que este modelo representa muy bien las mezclas de componentes polares y no polares como el metanol, etanol, glicerina, entre otros, así como también una fuerte no idealidad en la simulación. Por otro lado, para aumentar la eficiencia y disminuir la carga ambiental en las simulaciones se decidió hacer reciclo de los solventes utilizados.

El consumo de energía para cada método de extracción y producción de biodiesel fueron basadas en requerimientos de energía térmica por intercambiadores de calor, reboilers y secadores de biomasa obtenidos desde cada simulación desarrollada. Las especificaciones utilizadas se describen a continuación:

### Método de Extracción Hexano (EH)

En este método se mezcló la biomasa seca de microalga con hexano en una relación másica 20:1, a condiciones ambientales (25°C y 1 atm), luego esta mezcla se sometió a una separación por medio de un hidrociclón donde por la parte superior del equipo se extrae una corriente rica en aceite y solvente, y por la inferior la Biomasa Libre de Lípidos (BLL).

Figura 22. Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite con hexano.



La corriente rica en aceite fue sometida a un etapa de separación donde se pasó por un decantador para retirar el agua contenida en la microalga como se muestra en la figura 22, posteriormente la mezcla hexano-aceite, ingresó a una torre de destilación (DESTL-1) en donde por el tope, se recuperó el hexano (99.9%) que es recirculado al proceso, y por los fondos se obtuvo el aceite (99.9%) como producto [50]. Por otro lado la BLL pasó por un secador donde se retiró el solvente y el

aceite remanente y luego se ingresó nuevamente al sistema para aumentar la eficiencia del proceso.

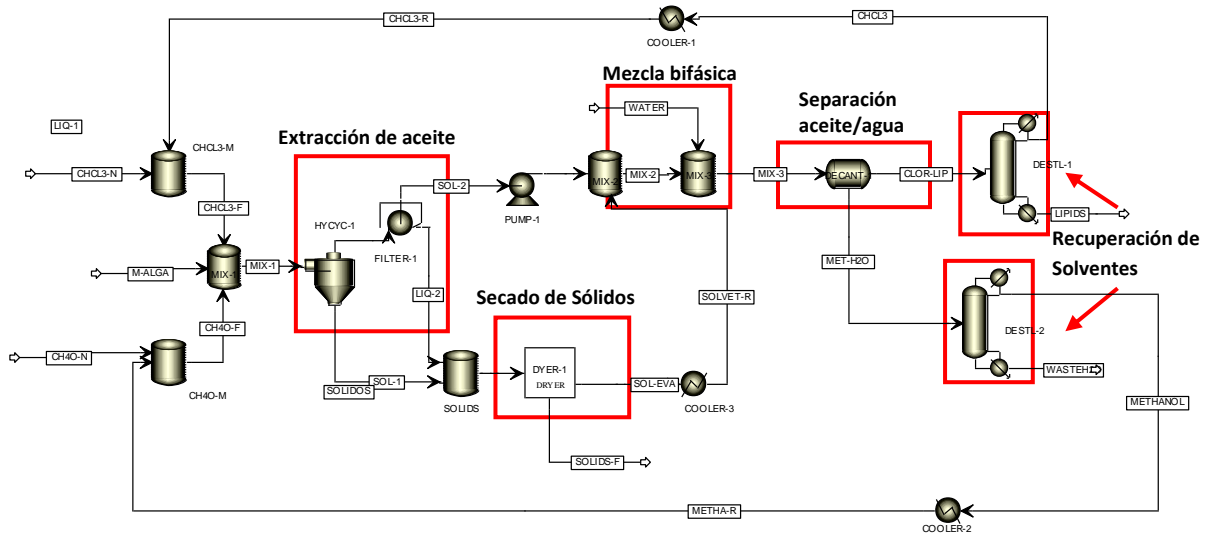
Los principales flujos de masa y energía del proceso en una relación másica biomasa/hexano de 20:1 y 33:1, se muestran en la tabla 15. Cabe resaltar que el proceso que presenta una relación másica 33:1 de biomasa/hexano presenta el mismo procedimiento descrito anteriormente.

### **Método de Extracción con Metanol-Cloroformo (EMC)**

En este método de extracción se creó una mezcla Metanol/Cloroformo/Biomasa a condiciones ambientales (1 atm y 25°C) con una relación másica 6:12:1 [47, 117, 50], luego se sometió esta mezcla a un proceso de filtración en un hidrociclón, de allí se obtuvo una corriente líquida rica en solventes y lípidos, y, una corriente de Biomasa Libre de Lípidos (BLL). El flujo líquido se mezcló con agua en una proporción 4:1 agua/biomasa, para crear una mezcla bifásica y así mejorar la eficiencia de la extracción como se muestra en la figura 23.

Para la purificación del aceite cada fase se sometió a un proceso de separación por medio de destilación para recuperar los solventes en el tope de la torre DESTL-1 (Cloroformo (99.9%) y Metanol (97.4%)), y en los fondos de las torres se obtienen lípidos (99.9%) (DESTL-1) y agua de desecho (DESTL-2). La corriente de sólidos se evaporó para recuperar el solvente y aceite contenido en la BLL, y con ello aumentar la eficiencia de extracción y hacer posible la utilización de la biomasa. En la tabla 15 se presentan los principales flujos de materia y energía obtenidos de la simulación realizada en el software Aspen Plus.

**Figura 23. Diagrama de flujo del proceso de extracción de aceite con metanol- cloroformo.**



### **Método de Extracción con Etanol Hexano (EEH)**

En el proceso para el método de extracción con la mezcla de solventes Etanol/hexano (figura 24), primero la biomasa se mezcló con el etanol en una relación másica 4:1 a condiciones ambientales (1 atm de presión y 25°C). La mezcla obtenida pasó a un proceso de separación (hidrociclón) en el cual se separaron los sólidos de los líquidos y la BLL se sometió de nuevo al proceso para aumentar la eficiencia. La purificación de los lípidos se realizó por la formación de un sistema bifásico generado por la creación de una solución hidroalcohólica 40% de agua (v/v) y la adición de hexano con una relación de 1:1 con respecto a la solución hidroalcohólica [47, 117, 118].

Seguidamente el sistema bifásico pasó a un decantador donde la fase hexánica rica en lípidos es sometida a un proceso de destilación para obtener una corriente de lípidos (producto) al 99.9% y una de hexano que es recirculada. Por otra parte la fase hidroalcohólica pasó a un proceso de separación donde se recuperó parte del etanol (92%) y se generó una corriente de agua como desecho. Según lo reportado por Fajardo A.R et al. (2007) [118] con este método es posible obtener hasta 98% de la extracción cuantitativa de los lípidos purificados [44, 46].



El valor ácido del aceite microalgas fue determinado por Ehimen *et al.* (2010) [94] en 5,11% (sobre la base del peso del aceite). En este estudio, se utilizó este valor, como se muestra en la sección de la descripción de la especie de microalgas. Primero fue desarrollada una esterificación ácida con catálisis alcalina seguida por una transesterificación con catálisis básica [115].

**Tabla 15. Flujos de masa y energía de los sistemas de extracción de aceite estudiados.**

Sistemas de extracción	EH – (33:1)	EH - (20:1)	EMC	EEH	Unidad
Corrientes	Cantidad	Cantidad	Cantidad	Cantidad	
<b>Flujos de entrada</b>					
Biomasa seca	3,090	3,090	3,174	3,099	t
Hexano	0,003	0,0028	-	0,0013	t
Metanol	-	-	4,281	-	t
Etanol	-	-	-	6,236	t
Cloroformo	-	-	0,00084	-	t
Agua	-	-	11,868	26,279	t
Calor	118887,4	72431,5	80091,4	107673,2	MJ
Electricidad	13,31	7,707	4,563	1,808	kW-h
<b>Flujos de salida</b>					
Biomasa libre de lípidos (coproducto)	2,007	2,007	2,062	2,013	t
Aceite de microalgas	0,929	0,929	0,928	0,928	t
Agua de desecho	0,156	0,156	16,334	32,674	t

La reacción de esterificación fue simulada basado en la estequiometría y asumiendo una conversión fraccional de 0,97 mol basado en los AGL. De esta manera, los AGL no deseado se puede transformar en biodiesel y el agua en un entorno ácido [115]. El ácido sulfúrico fue usado como catalizador ácido en una relación másica de 2.261% ácido/aceite y metanol como alcohol, una relación molar de 6.126:1 alcohol/aceite y la reacción fue evaluada en 55°C [119]. Dado que el agua y el ácido ha representado un inconveniente en las siguientes etapas, una etapa de neutralización y decantación se encuentra justo después del reactor de esterificación como se muestra en la figura 25. El agua se removida junto con el

biodiesel obtenido desde la mezcla. Los triglicéridos son enviados al reactor de transesterificación [115].

Para el proceso transesterificación el NaOH ha sido seleccionado como catalizador básico. Una cantidad pequeña, de relación másica de 1% catalizador/aceite fue usada. A pesar de los problemas de seguridad, el metanol se prefiere a escala industrial debido a su alta reactividad y su bajo coste. Basado en estudios de transesterificación con catálisis básica, la reacción se llevó a cabo a una temperatura cerca al punto de ebullición del alcohol (60 °C para el metanol). Para favorecer la reacción hacia la formación de productos, un exceso de metanol fue usado (relación molar 6:1 metanol/aceite). Esta relación molar de 6:1 también ha sido confirmada por numerosos estudios [55, 120, 121, 122]. Con el fin de obtener biodiesel desde aceite de microalgas una reacción de transesterificación se realizó en un reactor con agitación continua. En este reactor, 97,7% de los triglicéridos que entra se transformaron en biodiesel y glicerol [116]. Una pequeña cantidad de aceite sin reaccionar, catalizador, y alcohol esta presentes en producto de Biodiesel y glicerol [123].

Los productos de la etapa de transesterificación de aceite de microalgas (biodiesel y glicerol) fueron enfriados hasta una temperatura de 30 °C. Con el fin de remover la fase rica en glicerol un decantador (separación biodiesel/glicerol) fue usado. Los alquilesteres (FAME por sus siglas en ingles) y el glicerol se enfrían y se separa a una temperatura inferior a la presión atmosférica y simplemente debido a su inmiscibilidad y la diferencia de gravedad específica. El glicerol se retira por parte inferior del decantador [116]. Tanto la fase rica en biodiesel y la fase rica en glicerina contiene catalizador básico que debe ser neutralizado con un ácido fuerte para evitar la formación de jabones y emulsiones [124].

El biodiesel obtenido después de la neutralización fue enviado a una torre de destilación con el fin de eliminar el metanol. Después de la eliminación de glicerol y metanol de la corriente de biodiesel fue enviado a la etapa de lavado con el fin de eliminar las impurezas. Un decantador se utilizó entonces para separar el agua del biodiesel. Por último, el biodiesel se envió a una torre de destilación con el fin de eliminar el exceso de agua. El biodiesel obtenido a partir de la microalga satisface la mayor parte de las especificaciones de la normativa de la Unión Europea y Estándares Americanos (ver anexo B).

En el caso de que la glicerina sea purificada, su tratamiento consiste en una instalación continua con una sección de pretratamiento para eliminar los jabones y ácidos grasos libres que pudiera contener. Posteriormente se introduce en una columna de destilación para separar las fracciones livianas (agua, metanol, metiléster).

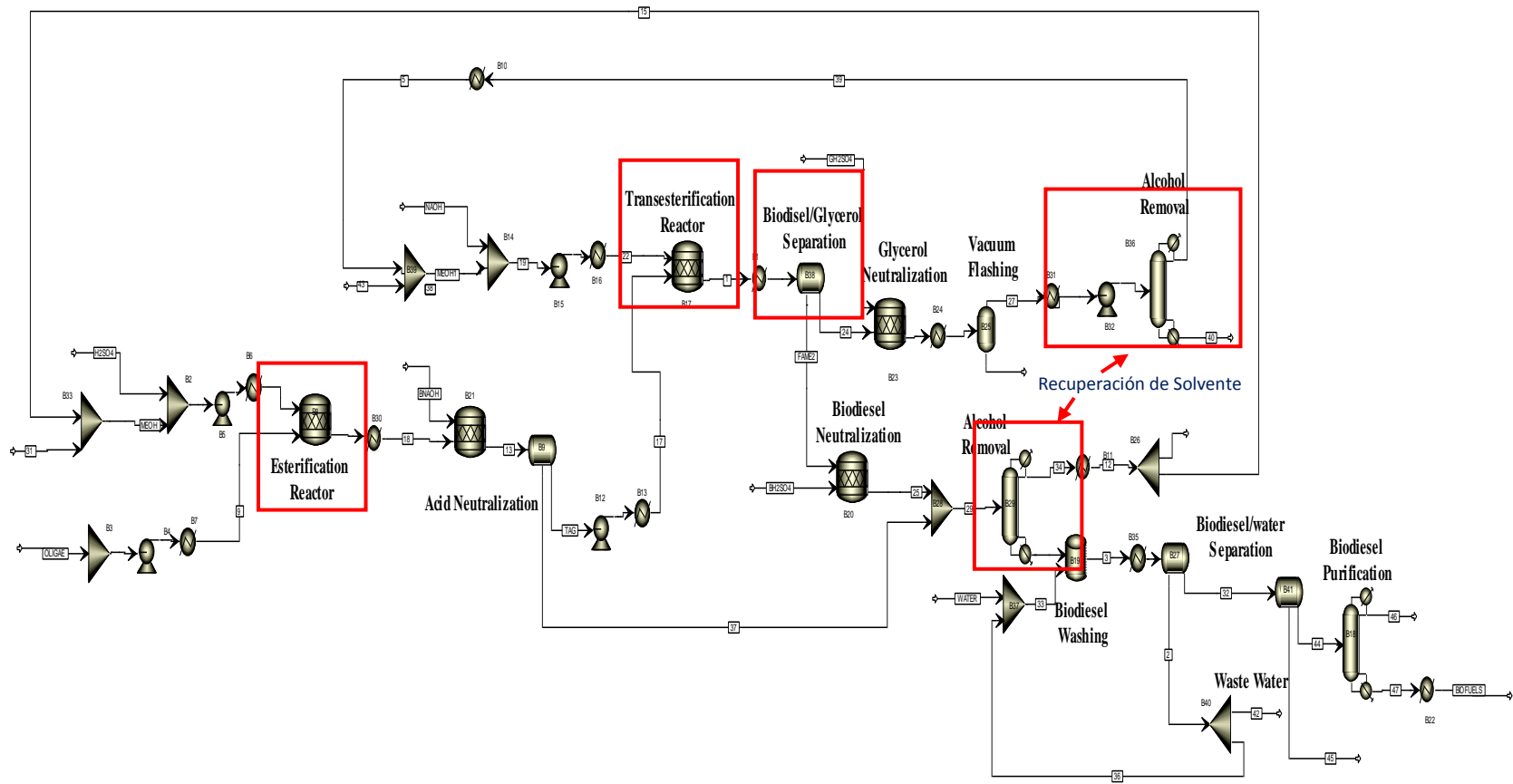
Los productos de fondo de la columna se envían a un separador de sales y de la fracción más pesada. El producto pesado (sales, colas y otros) se descarga en un recipiente intermedio. Por último en una segunda columna se rectifica la glicerina, obteniéndose una glicerina con un elevado título (99% mínimo) siendo necesario para alcanzar la calidad farmacéutica proceder a la decoloración y desodorización. Esto último se efectúa generalmente con carbón activo.

Los datos de consumos de materias primas considerados en este estudio para los procesos productivos del biodiesel se muestran en la tabla 16.

**Tabla 16. Flujos de masa y energía del proceso de esterificación-transesterificación de aceite de microalgas.**

<b>Componente</b>	<b>Cantidad</b>	<b>unidad</b>
<b>Flujos de entrada</b>		
Aceite de microalgas	1,028	t
Metanol	0,147	t
NaOH	0,011	t
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,013	t
Agua	0,088	t
Calor	1870	MJ
Electricidad	2,512	kW-h
<b>Flujos de salida</b>		
Biodiesel (producto)	1	t
Glicerina refinada (co-producto)	0,134	t
Agua de desecho	0,115	t
Residuos de aceite	0,037	t
<b>Flujos de masa y energía del proceso de destilación de glicerina farmacopea (por kg de glicerina, adaptación realizada desde Lechón et al., 2006).</b>		
Agua	5,106	kg
Carbón activo	0,00212	kg
Calor	5,213	MJ
Electricidad	0,1064	kW-h

Figura 25. Diagrama de flujo del proceso de producción de biodiesel mediante las reacciones de esterificación/transesterificación.



## **2.6 EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL**

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida bajo el enfoque de prospectiva tecnológica se escogió como herramienta para evaluar los impactos ambientales potenciales de cada uno de los escenarios estudiados del proceso que se encuentra en desarrollo y no está implementado aún. Esta metodología se describe a continuación:

**2.6.1. Definición del objetivo y el alcance.** En esta fase se determina el tipo de información necesaria para desarrollar el estudio, la exactitud necesaria de los resultados y cómo deben ser interpretados estos para que sean significativos durante el proceso de toma de decisiones.

**2.6.1.1. Definición del objetivo:** El objetivo de este estudio, es aplicar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del proceso de producción de biodiesel a partir de microalgas –bajo el enfoque del análisis de prospectiva tecnológica-, a partir de diversos escenarios, partiendo de los datos obtenidos en el modelado y la simulación de procesos llevado a cabo para los diferentes procesos unitarios estudiados.

**2.6.1.2. Alcance del estudio:** Los resultados del ACV realizado servirán como herramienta para la toma de decisiones tecnológicas y ambientales sobre el proceso de producción de biodiesel a partir de microalgas, que indudablemente tiene un gran potencial como fuente de energía. Dichas decisiones se pueden soportar en la identificación de las mejoras que permitan reducir los impactos ambientales a lo largo del ciclo de vida, una vez detectados los impactos en cada etapa del proceso.

### **Función de los sistemas estudiados**

La función o funciones de los sistemas describen las características de operación del mismo, en este análisis el sistema estudiado cumple la función de servir como combustible para un vehículo.

### **Unidad funcional**

La unidad funcional es una medida del comportamiento de las salidas funcionales de un sistema y su propósito es proporcionar una referencia para las entradas y salidas del mismo. Esta referencia es necesaria para asegurar que la comparación de los sistemas se hace sobre una base común. La unidad funcional seleccionada ha sido definida en 1 ton de biodiesel producido.

**2.6.1.3. Definición de los sistemas a analizar:** Los escenarios estudiados en el Análisis de Ciclo de Vida fueron descritos anteriormente y estos son mostrados en el apartado 2.4 de esta investigación.

### **2.6.1.4. Límites de los sistemas**

**Límites geográficos:** La cadena de proceso se refiere a un sistema hipotético, ubicado en la región Caribe de Colombia; como consecuencia de los datos climáticos para determinar las pérdidas de agua por evaporación fueron basadas en las estadísticas climatológicas del norte de Colombia. Se asumió que el sistema de cultivo, cosecha secado y extracción de aceite estará ubicado en Barranquilla, por la factibilidad de cultivar las microalgas en el mar y con ello evitar comprometer el agua dulce. La producción de biodiesel se realizó en Santa Marta ya que allí se encuentra una planta productora de biodiesel llamada Biocombustibles Sostenibles del Caribe.

**Límites temporales:** Se han considerado datos del proceso preferiblemente referidos a los últimos ocho años. El límite temporal del análisis de impactos potenciales del estudio fue de 100 años, ya que este es el tiempo considerado en la metodología de evaluación de impactos EPD 2007.

#### **2.6.1.5. Metodología de la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida**

La fase de evaluación de impacto ambiental del ciclo de vida (EICV) tiene como objetivo principal conocer y evaluar la magnitud de los impactos ambientales en los sistemas analizados.

De acuerdo con la norma ISO 14040/44 de 2006, los elementos obligatorios son:

- Selección de las categorías de impacto, indicadores de categoría y modelos de caracterización
- Asignación de resultados del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) a las categorías de impacto seleccionadas (Clasificación)
- Cálculo de los resultados de indicadores de categoría (Caracterización).

**2.6.1.6. Herramienta utilizada:** Este ACV se realizó utilizando una herramienta informática comercial denominada SimaPro 7.1 [125]. SimaPro es una herramienta desarrollada por Pré Consultants para el Análisis de Ciclo de Vida que analiza y compara los aspectos medioambientales de un producto de una manera sistemática y consistente siguiendo las recomendaciones de las normas ISO serie 14040/44.

La primera versión de SimaPro data de 1990 y desde entonces ha sido utilizado por empresas, consultoras, universidades y centros de investigación en multitud de estudios lo cual avala su capacidad y potencial en este tipo de análisis.

## **La Base de Datos**

Uno de los principales elementos del programa es la Base de Datos. Esta Base de Datos puede contener varias librerías o proyectos que a su vez agrupan diferentes procesos. Todas las entradas y salidas de un proceso están definidas en el registro de la base de datos de ese proceso. Los procesos se separan en siete categorías: materiales, energía, transporte, procesado, uso, escenario de residuos y tratamiento de residuos. Además, la base de datos contiene datos de carácter general como son los nombres de sustancias, las unidades de medida, referencias de la literatura, etc.

La base de datos por defecto contiene librerías de distintos autores con datos de energía, industriales, materiales, transporte y métodos de evaluación de impacto.

## **La evaluación de impacto**

Las categorías de impacto que se han seleccionado para este estudio son las más representativas a la hora de realizar un estudio de ACV de sistemas energéticos, como son la de calentamiento global, por la cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero; y la de consumo de energía fósil. No obstante, también se han calculado los resultados de la comparación del impacto en otras categorías significativas como la de acidificación, eutrofización, agotamiento de la capa de ozono y precursores de foto oxidantes químicos u ozono troposférico.

## **Método de caracterización**

SimaPro incluye varios métodos de evaluación de impacto reconocidos. Todos utilizan el procedimiento de caracterización por el cual se calcula la contribución relativa de una sustancia a una categoría de impacto determinada. Además algunos métodos también utilizan otros procedimientos como la evaluación de daño (Eco-Indicator 99), la normalización o la ponderación. El programa también permite crear propios métodos de evaluación de impacto. En el presente estudio

de impacto se ha utilizado la herramienta SimaPro para el montaje de los procesos de inventario y para la realización de la evaluación de impacto.

El método EPD 2007 representa 6 categorías diferentes de impacto (ver tabla17) [125] y ha sido escogida como método de evaluación de impacto de los diferentes escenarios estudiados, método utilizado para crear las declaraciones ambientales de producto (Environmental Product Declaration). En este método ha sido desarrollado en forma de borrador (v.1.02) por el SEMC (Swedish Environmental Management Council). Los factores de caracterización, excepto para la categoría de consumo de energía fósil, están tomados directamente del método CML2 baseline 2000 desarrollado por el Instituto de Estudios Medioambientales de Leiden (CML) (Holanda). Ambos métodos se encuentran incorporados en la propia herramienta SimaPro [126].

**Tabla 17. Categorías de Impacto para el método EPD 2007.**

CATEGORIAS DE IMPACTO	
Nombre	Descripción
Potencial de Calentamiento Global (PCG 100)	Representa la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos con su respectivo potencial de calentamiento global (CO <sub>2</sub> equivalente). Dado que estos gases tienen diferente duración en la atmósfera se calcula para un horizonte de 100 años.
Agotamiento de la Capa de Ozono	Se refiere al adelgazamiento de la capa de ozono, causada por compuestos como los halones y los clorofluorocarbonados (CFC).
Acidificación	Hace referencia a la lluvia ácida, los principales contaminantes son SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , HCl y NH <sub>3</sub> . La característica común es la formación de iones H <sup>+</sup> , por lo que el impacto se mide en H <sup>+</sup> equivalentes.
Oxidación Fotoquímica	Son contaminantes formados por NO <sub>x</sub> e hidrocarburos en presencia de luz solar. Causan problemas de salud como irritación en el sistema respiratorio y daños a la vegetación.
Eutrofización	El término incluye los impactos debido a los excesivos niveles de macronutrientes en el medio ambiente causado por las emisiones de nutrientes al aire, agua y suelo. El potencial de eutrofización se

## CATEGORIAS DE IMPACTO

Nombre	Descripción
	expresa a menudo como PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> equivalentes.
No Renovables, Fósiles	Esta categoría hace referencia al consumo de combustibles fósiles.

El método EDP 2007 es un enfoque documentado de punto medio, que cuantifica datos ambientales para un producto basado en los parámetros de la norma ISO 14040 [127] y enfocado a proporcionar información relevante para la comparación equitativa de productos y servicios basados en sus rendimientos ambientales.

**2.6.1.7 Tipo de interpretación:** En la fase de interpretación los resultados de Análisis de Inventario del Ciclo de Vida y de la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida, se resumirán y someterán a discusión para establecer conclusiones acordes con la definición del objetivo y alcance. A partir de esta fase se identificarán las principales cargas ambientales y por tanto los puntos del sistema evaluado que pueden o deben mejorarse así como las conclusiones finales.

**2.6.1.8. Limitaciones del estudio:** La escasa información experimental e industrial en la literatura científica actual, referida a la cadena de producción de biodiesel a partir de microalgas, implica la necesidad de utilizar en algunos casos valores aproximados de flujos de los procesos en estudio. Esta aproximación, será realizada de acuerdo con la normativa existente de análisis de inventario de ciclo de vida, que implica la suposición, predicción o no inclusión de las corrientes aproximadas en el análisis.

Por otra parte, y siguiendo los criterios establecidos en los requisitos de calidad de los datos de inventario, de acuerdo con la normativa de ACV, en el caso de flujos de corrientes no disponibles, se utilizarán bases de datos reconocidas internacionalmente, de manera que los valores utilizados para dichos flujos respondan a procesos controlados con normatividad más restrictiva que la Colombiana (e.g.,

Directiva Europea de Biocombustibles, Directive 2009/28/EC).

**2.6.1.9 Datos de entrada y requisitos de calidad:** En general, el inventario de los datos empleados se puede dividir en datos primarios y secundarios. Los datos primarios están relacionados específicamente con el *sistema producto*, y son datos que han sido obtenidas de fuentes ya publicadas teniendo en cuenta un horizonte temporal menor o igual a 8 años y el desarrollo de la tecnología a considerar será, la tecnología actualmente empleada en los procesos considerados. Cabe resaltar que para el sistema de cultivo se han usado datos de diseño y consumo de energía eléctrica con un horizonte temporal mayor debido a que es una tecnología estudiada e implementada hace bastante tiempo.

Para el sistema de cosecha de biomasa los datos fueron ajustados a partir de tecnologías existentes de sistemas de floculación basados en plantas de tratamiento de aguas residuales. En el sistema de secado para la deshidratación mecánica se han utilizado datos proporcionados por Evodos<sup>11</sup> que desarrolló una centrifuga con un consumo de energía menor que las centrifugas convencionales y esta tecnología base ha sido aceptada por la industria de cultivo de algas. Para la deshidratación térmica se usó datos proporcionados por una tecnología base de deshidratación de fangos usada comercialmente como lo son los secadores de cinta.

Para el caso del proceso de extracción de aceite, se han utilizado datos publicados en el estudio de González-Delgado *et al.* (2010) de condiciones de operación provistos por pruebas experimentales realizadas en el laboratorio de biomasa, escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander con el fin de crear los procesos hipotéticos de extracción de aceite mediante simulación de procesos (software Aspen Plus® 7.1), ya que actualmente no se cuenta con producción de aceite de microalga a escala comercial.

---

<sup>11</sup> <http://www.evodos.eu/about-evodos/mission-vision.html>

Para el proceso de Esterificación - transesterificación de aceite se han tomado datos de fuentes ya publicadas de procesos similares y existentes a partir de otras materias primas como aceite de soya y aceite de palma, entre otros y estos fueron ajustados y simulados en el software Aspen Plus® 7.1.

De otro lado, los datos secundarios no están específicamente relacionados con el sistema producto y se derivan generalmente de bases de datos genéricas de Inventario del Ciclo de Vida (ICV). Ejemplos de ello son la producción de fertilizantes minerales, transportes, combustibles y productos químicos básicos. En este caso los datos secundarios fueron obtenidos de la base de datos de ACV Ecoinvent v 2.2 (ecoinvent centre 2009), LCA Food DK y Buwal 250 disponibles en la herramienta informática SimaPro 7.1. Ecoinvent es la base de datos internacional de ICV más completa y transparente y todos los datos de inventario son establecidos de acuerdo con altos estándares de calidad.

La producción de los insumos químicos y fertilizantes necesarios en el proceso fueron considerados dentro del estudio, así mismo su transporte dentro de los límites Colombianos. Estos procesos fueron llamados de la base de datos como Unit Process, que básicamente contienen la información necesaria para la identificación de los aspectos más relevantes de los procesos involucrados. Como ya se mencionó antes, la base de datos contenida en ECOINVENT, no sólo es una recopilación de datos, sino que permite identificar toda la información necesaria para la identificación de los criterios de calidad de datos, tal como establece la normativa vigente. Así mismo, y tal como establece la normativa, se han planteado algunas suposiciones necesarias para que el proceso de recopilación de información, no se hiciera ilimitado, dado las condiciones limitaciones descritas inicialmente, respecto a la información disponible. Tales suposiciones se basan fundamentalmente en que los procesos de obtención de tales materias primas, son similares en el país.

Para el caso de generación de calor y consumo de energía eléctrica en Colombia, se usó datos reportados por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) de Colombia [128], los escenarios creados como Unit Process en SimaPro de producción de energía térmica y eléctrica se muestran en el anexo C y D, y corresponden con información disponible en el momento de elaboración de este estudio, aspecto este permitido también y explícitamente definido en la normativa. Otro elemento importante de SimaPro es el sistema de indicadores de calidad de los datos basado en los requisitos expuestos en la ISO 14041. Este sistema evalúa la idoneidad de los datos asignándoles una puntuación ponderada teniendo en cuenta el perfil que se haya definido en el objetivo y alcance [129].

**2.6.1.10 Etapas excluidas del análisis:** Quedan excluidas del análisis las cargas ambientales asociados a la construcción y el mantenimiento de la planta, a la fabricación de los vehículos de transporte, así como los factores económicos y sociales. Del mismo modo, la importación de los insumos químicos y la aplicación de anilina no fueron consideradas.

**2.6.2 Análisis de Inventario de los sistemas bajo estudio.** Los balances de masa y energía para los diferentes procesos unitarios que envuelven el ciclo de vida de producción de biodiesel fueron desarrollados sobre cada etapa en el apartado 2.3, donde se muestra cada uno de los flujos de entrada y salida tanto de masa como de energía y una descripción detallada de cada una de las unidades del proceso de producción de biodiesel, resultados que son usados en el desarrollo de este inventario.

Una vez se han detectado que los datos son los necesarios para el análisis se procede a hacer el inventario del ciclo de vida. Primero se buscan aquellos datos que no están contenidos dentro de las librerías y se introducen en los registros de los procesos de la herramienta. Después SimaPro genera automáticamente un árbol de procesos o diagrama uniendo todos los procesos.

Este apartado presenta las entradas y las salidas del inventario de cada una de las etapas comprendidas en la obtención del biodiesel y su vinculación con la unidad funcional. Se han inventariado de forma separada según el esquema presentado en las figuras 11 y 12, referente a los límites del sistema, todos los procesos identificados para el proceso de producción de biodiesel.

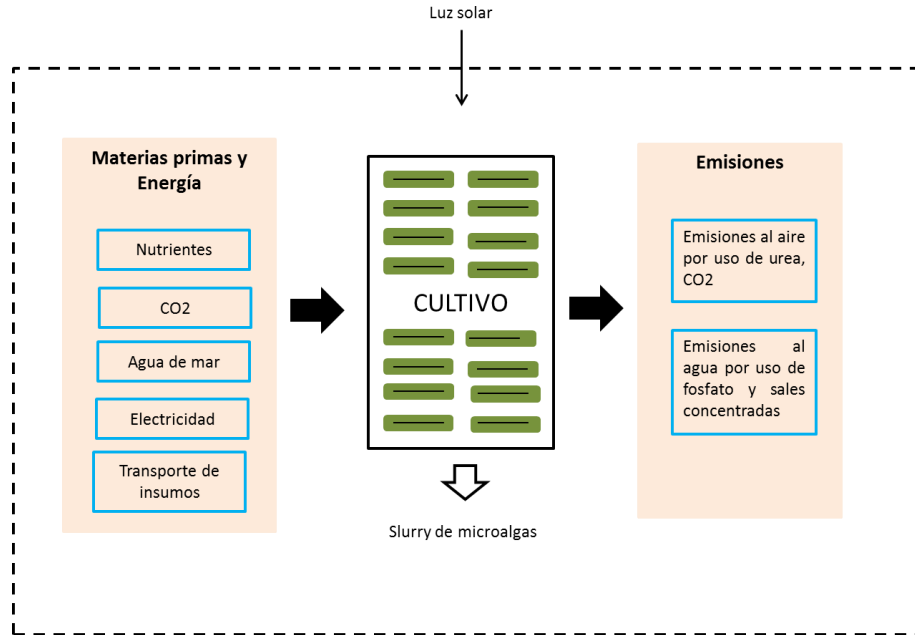
**2.6.2.1 Inventario del Cultivo de Microalgas:** Dentro de los límites de la etapa de cultivo se involucra los siguientes procesos:

- Producción de nutrientes: Incluye los procesos de producción de los nutrientes, desde la obtención de las materias primas hasta la fabricación del producto final así como su transporte hasta el área del sistema de cultivo.
- Consumo de agua de mar: en esta etapa se consideran las cargas asociadas a la obtención de la energía necesaria para bombear el agua de mar hasta el cultivo que se encuentra cerca de una zona costera.
- Producción de electricidad: incluye su producción y el transporte del producto hasta el usuario final.
- Producción de CO<sub>2</sub>: el CO<sub>2</sub> tomado como alimento para el crecimiento de las microalgas en el cultivo no ingresa como producto de un proceso sino que es tomado como residuo emitido de un proceso industrial (centrales eléctricas, cementeras, etc).

El transporte tanto de la urea y del CO<sub>2</sub> de la etapa de cultivo se ha incluido y obtenido de la base de datos de Ecoinvent de SimaPro y no están especificadas en la figura 26. El transporte de los insumos se realiza desde el terminal marítimo de Barranquilla hasta la zona del cultivo. Para este estudio, se asumió que la urea se transportó 2 km por carretera en camión. Asimismo, se ha considerado que el CO<sub>2</sub> se transporta 2 km por tubería para gas hasta la zona del cultivo asumiendo que cerca de la planta se encuentra alguna central eléctrica u otro proceso que

generen el CO<sub>2</sub> emitido y a este CO<sub>2</sub> no se le asignan cargas porque es una emisión. Las cargas ambientales de este transporte se obtienen de SimaPro.

**Figura 26. Diagrama del proceso del cultivo de microalgas.**



Para el cálculo de las emisiones directas asociadas al proceso de cultivo de microalgas se han obtenido a partir de datos ya publicados de pruebas de laboratorio realizadas a sistemas de cultivo en estanques abiertos. Las emisiones al aire de N<sub>2</sub>O son una fuente importante de gases de efecto invernadero, su cuantificación es extremadamente incierta puesto que son muy variables dependiendo de las condiciones ambientales a las que está expuesto el cultivo. Las cantidades de óxido nitroso emitidas al aire por aplicación de urea (46% N) se consideró a partir de datos reportados por Fagerstone *et al.* [130], donde calcularon que el total de emisiones directas de N<sub>2</sub>O producido desde la aplicación de urea como N es de  $2,35 \times 10^{-5}$  kg N<sub>2</sub>O/kg de N. Las emisiones de CO<sub>2</sub> fueron calculadas a partir del CO<sub>2</sub> que no fue capturado por la microalga. Por último se contabilizó como emisiones al aire las pérdidas de agua por evaporación a partir

de datos publicados de la climatología del caribe Colombiano en este caso de la ciudad de Barranquilla [103].

Las emisiones al agua directas de  $(\text{PO}_4)^{-3}$ , producido desde la aplicación de triple superfosfato (48%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) fueron calculadas a partir de datos reportados por Hou J. *et al.* 2011[131] con un valor de 0,7364 kg  $\text{PO}_4^{(3-)}$ /kg  $\text{P}_2\text{O}_5$ . La concentración de sales emitida al agua de mar por causa de la evaporación de agua fue calculada a partir de datos reportados por Campbell *et al.* 2011[65] donde se asumió que 84,7 t/ha\*año de sales son concentradas.

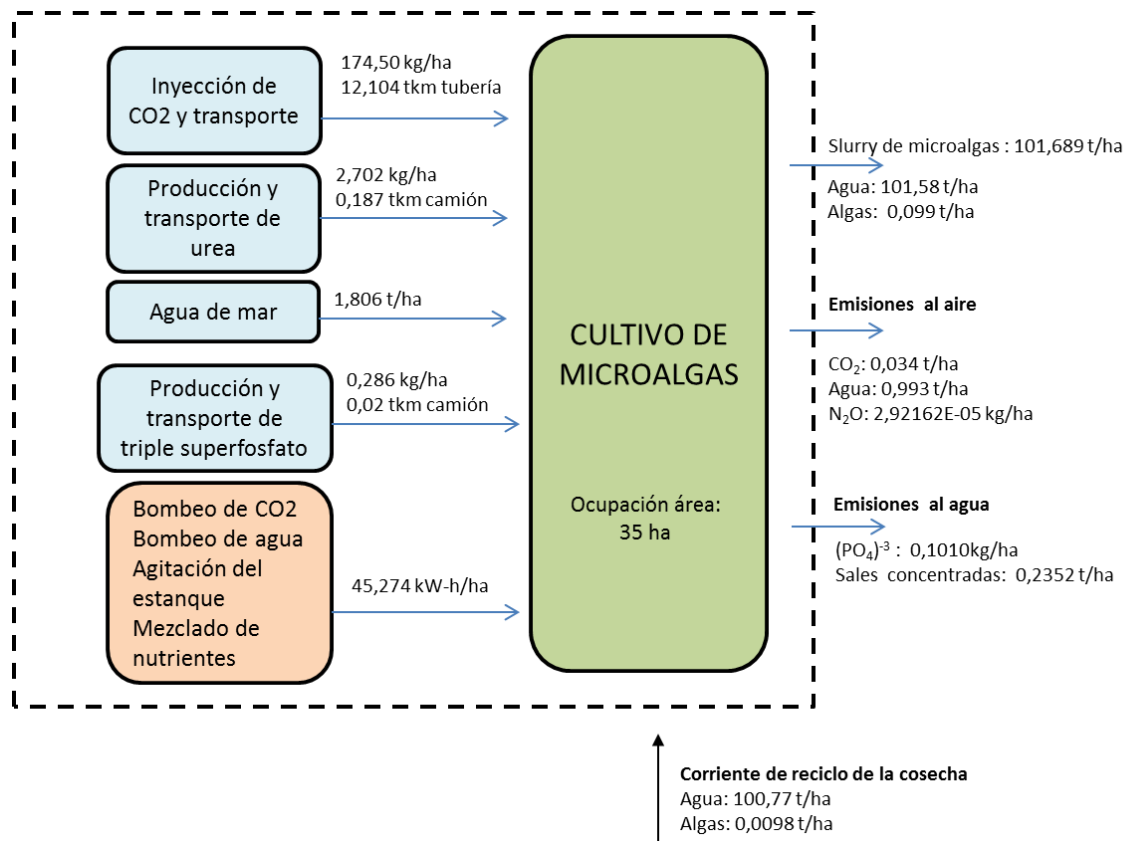
En la figura 27 se muestra el diagrama de flujo esquemático del sistema de cultivo donde se describe cada una de las entradas, salidas y emisiones consideradas dentro del inventario del cultivo cada una de ellas están vinculadas a la unidad funcional.

La corriente de reciclo mostrada en la figura 27, es el reciclo de slurry que proviene de la etapa de recolección de biomasa o cosecha posterior al cultivo, esta corriente de agua no se tomó como entrada del cultivo ni como salida de la etapa cosecha ya que esta corriente no es un vertido sino es un flujo que vuelve al proceso.

**2.6.2.2. Inventario del sistema de cosecha de microalgas o recolección de biomasa de microalgas:** Dentro de los límites de la etapa de cosecha se involucra los siguientes procesos:

- Producción de floculante: Incluye los procesos de producción del floculante, desde la obtención de las materias primas hasta la fabricación del producto final así como su transporte hasta el área del sistema de recolección de biomasa.
- Producción de electricidad: incluye su producción y el transporte del producto hasta el usuario final.

**Figura 27. Diagrama de entradas y salidas del sistema de cultivo de microalgas (productividad 30 gm<sup>-2</sup>d<sup>-1</sup>).**

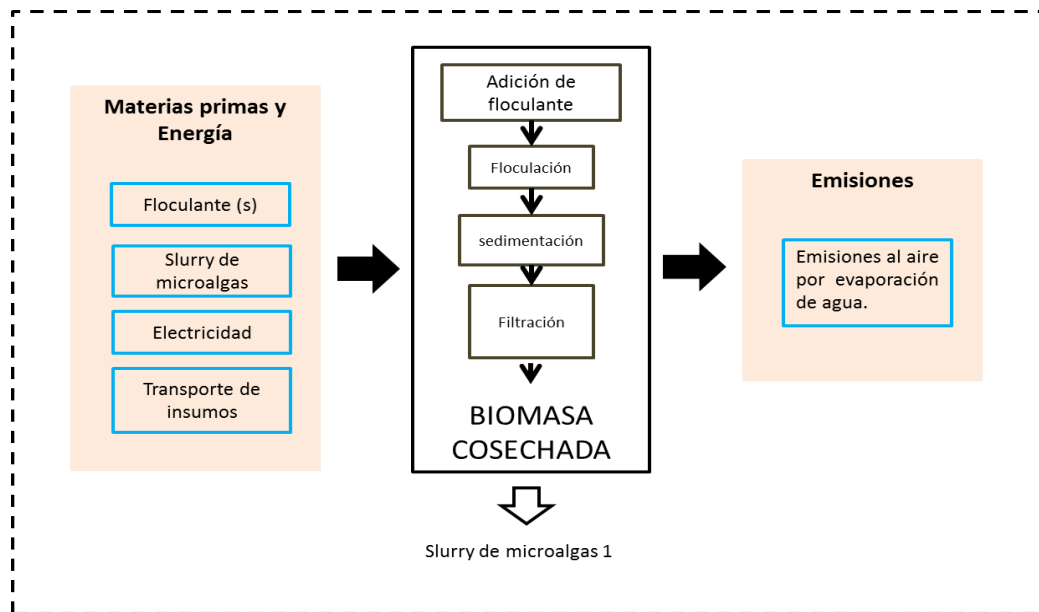


Como se mencionó anteriormente los sistemas de cosecha seleccionados para este estudio son: floculación química hidráulica (FQH), floculación química mecánica (FQM) y floculación microbiana con agitación hidráulica (FMCh) seguido cada uno por un proceso de filtración.

La producción de sulfato de aluminio, anilina y el transporte de insumos se ha obtenido de la base de datos de LCA food DK y Ecoinvent de SimaPro y no están especificadas en la figura 28. El transporte de los insumos se realiza desde el terminal marítimo de Barranquilla hasta la zona de la cosecha. Para este estudio, se asumió que el sulfato de aluminio y la anilina se transportó 2 km por carretera en camión. Las cargas ambientales de este transporte se obtienen de SimaPro.

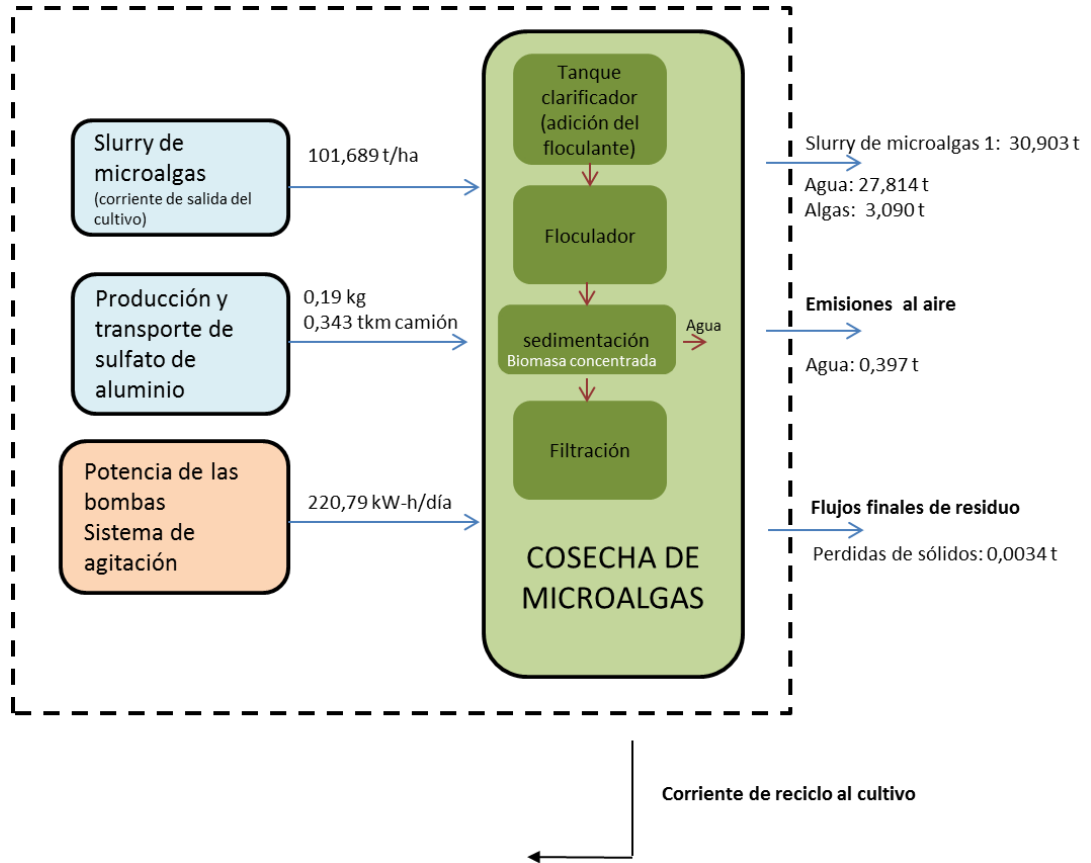
Para el cálculo de las emisiones directas asociadas al proceso se tuvo en cuenta la evaporación de agua como emisiones al aire y las pérdidas de sólidos como flujos finales de residuos.

**Figura 28. Diagrama del proceso de recolección de biomasa de microalgas.**



En la figura 29 se muestra el diagrama de flujo de los límites del sistema de cosecha donde se describe cada una de las entradas, salidas y emisiones consideradas dentro del inventario del proceso de recolección de biomasa. En este se puede apreciar la corriente de reciclaje indicada anteriormente en el inventario del cultivo la cual no fue incluida por las mismas consideraciones expuestas anteriormente en el cultivo. El diagrama esquemático mostrado en la figura 29 considera únicamente datos para un solo método de cosecha en este caso FQM, los datos para los otros dos procesos (FQH y FMCh) evaluados en este estudio son mostrados en la tabla 13 de la sección 2.5.3.

**Figura 29. Diagrama de bloque de entradas y salidas en el sistema de cosecha implementando el método de FQM.**

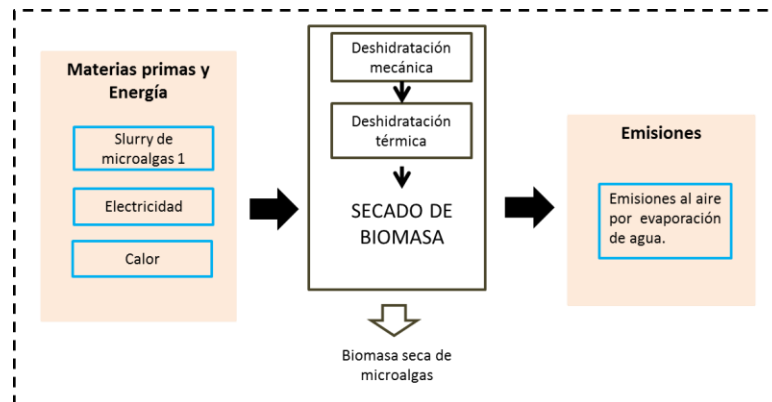


**2.6.2.3. Inventario del sistema de secado de biomasa de microalgas:** En la figura 30 se muestra el diagrama de flujo de las corrientes de entrada y salida consideradas en el sistema de secado. Dentro de los límites de esta etapa, se involucra los procesos:

- Generación de electricidad: incluye su producción y el transporte del producto hasta el usuario final.
- Generación de calor: incluye su producción y el transporte del producto hasta el usuario final.

Para la generación de calor y electricidad usados en el secado de la microalga y en este estudio en general no fueron tomadas de la base de datos de SimaPro, sino que estos escenarios fueron creados dentro de este mismo con datos Colombianos.

**Figura 30. Diagrama del proceso de secado de biomasa de microalgas.**

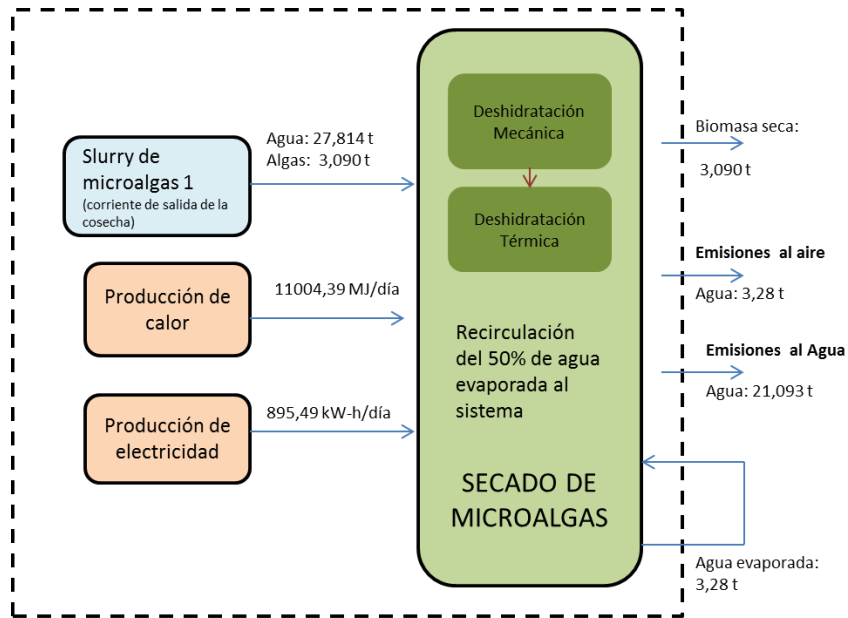


En la figura 31 se muestra el diagrama de flujo de los límites del proceso de secado donde se describe cada una de las entradas, salidas y emisiones consideradas dentro del inventario del sistema.

**2.6.2.4. Inventario del sistema de extracción de aceite de microalgas:** Dentro de los límites de la producción de aceite de microalgas se involucra los siguientes procesos:

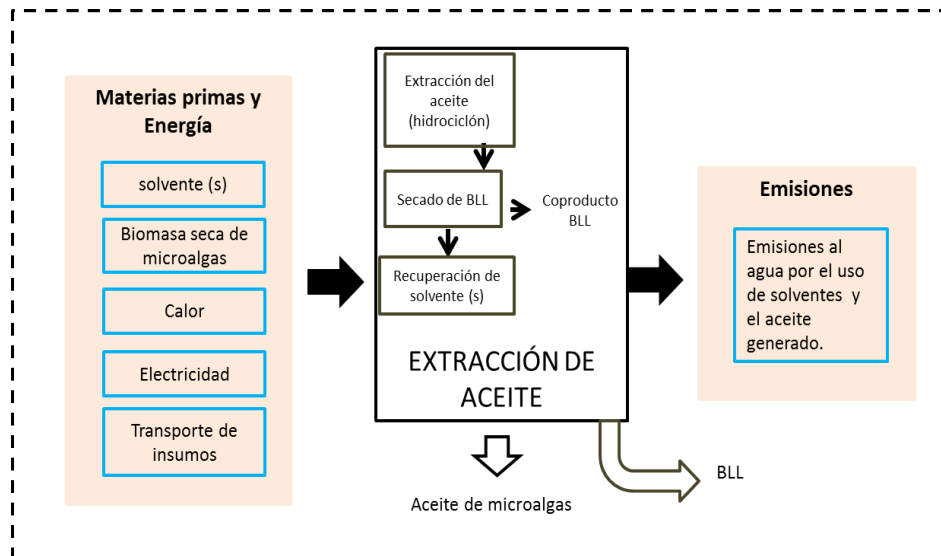
- Generación de electricidad: incluye su producción y el transporte del producto hasta el usuario final.
- Generación de calor: incluye su producción y el transporte del producto hasta el usuario final.
- Producción de solventes: Incluye los procesos de producción de los solventes, desde la obtención de las materias primas hasta la fabricación del producto final así como su transporte hasta el área de extracción de aceite de microalgas.

**Figura 31. Diagrama de bloque de entradas y salidas de la etapa de secado de biomasa de microalgas.**



La producción de cada uno de los solventes usados y su transporte de estos mismos se han obtenido de la base de datos de BUWAL250, LCA food DK, ETH-ESU 96 y Ecoinvent de SimaPro y no están especificados dentro de la figura 32.

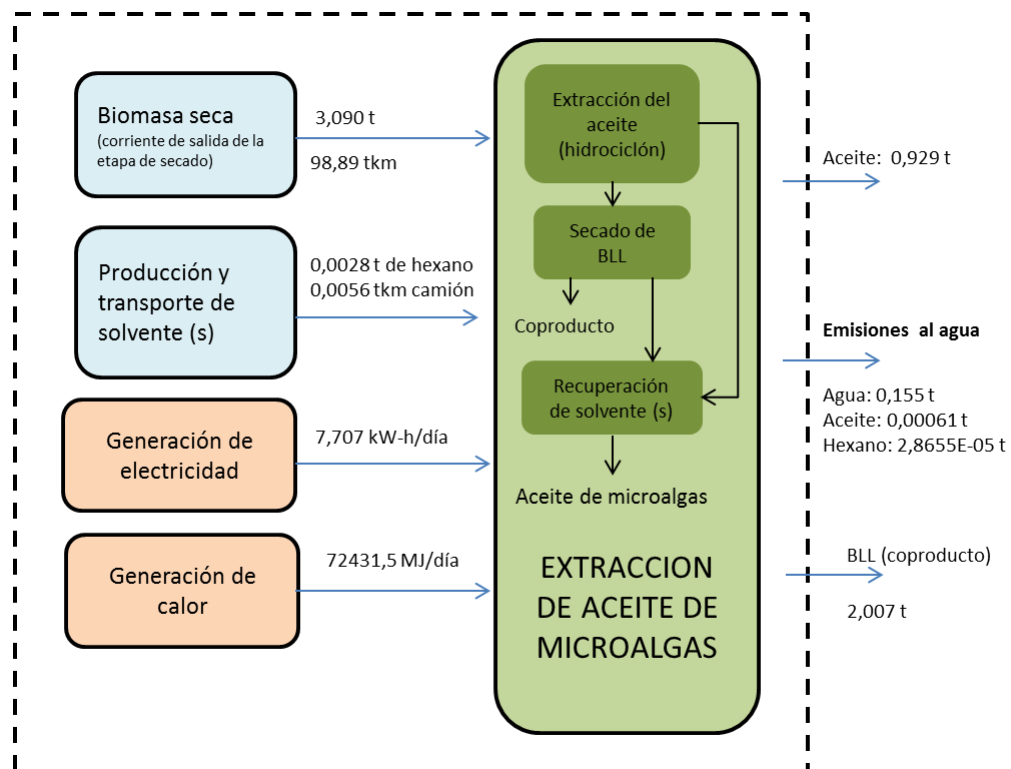
**Figura 32. Diagrama del proceso de extracción de aceite de microalgas método con hexano (EH).**



El transporte de los insumos se realiza desde el terminal marítimo de barranquilla hasta la zona industrial. Para este estudio, se asumió que el hexano, metanol, etanol y cloroformo que hacen parte a cada sistema de extracción estudiado se transportó 2 km por carretera en camión cisterna. Asimismo, se ha considerado que la microalga seca se transporta 32 km por carretera. Las cargas ambientales de este transporte se obtienen de SimaPro. Para el cálculo de las emisiones directas asociadas al proceso se tuvo en cuenta las emisiones al agua donde se encuentra agua, aceite y hexano.

En la figura 33 se muestra el diagrama de flujo esquemático del proceso de extracción de aceite donde se describe cada una de las entradas, salidas y emisiones consideradas dentro del inventario de este sistema, cada una de ellas están vinculadas a la unidad funcional.

**Figura 33. Diagrama de bloque de entradas y salidas del proceso de extracción de aceite de microalgas.**



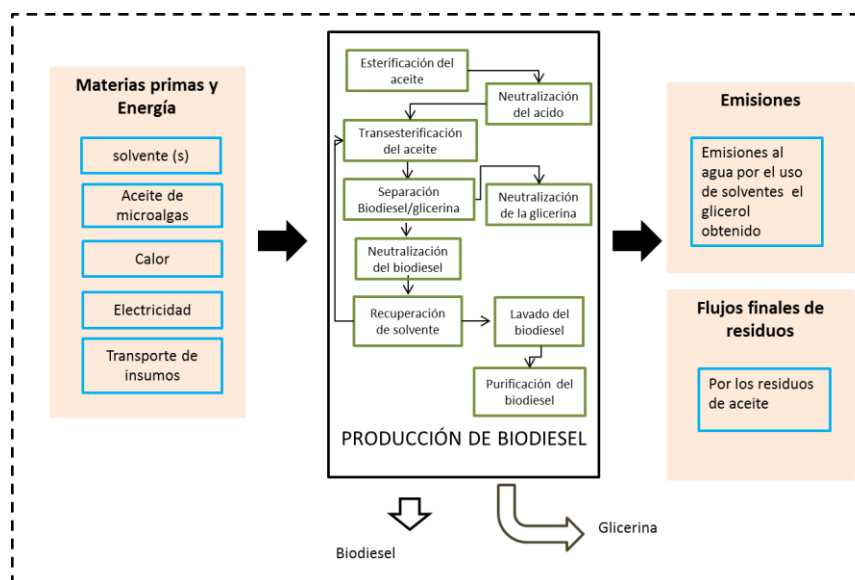
**2.6.2.5. Inventario del proceso de esterificación – transesterificación del aceite de microalgas:** Dentro de los límites de la producción de biodiesel se involucra los siguientes procesos:

- Generación de electricidad: incluye su producción y el transporte del producto hasta el usuario final.
- Generación de calor: incluye su producción y el transporte del producto hasta el usuario final.
- Producción de catalizadores y el alcohol: Incluye los procesos de producción de los catalizadores y el alcohol, desde la obtención de las materias primas hasta la fabricación del producto final así como su transporte hasta el área de producción de biodiesel.

La producción de cada uno de los insumos usados y el transporte de estos mismos se han obtenido de la base de datos de BUWAL250, LCA food DK, ETH-ESU 96 y Ecoinvent, todas ellas contenidas en las librerías de la herramienta SimaPro y no están especificados dentro de la figura 34.

El transporte de los insumos se realiza desde Puerto Colombia y la zona industrial de Santa Marta. Para este estudio, se asumió que el metanol, NaOH y el H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> se transportó 128 km por carretera en camión cisterna. Asimismo, se ha considerado que el aceite de microalgas se transporta 102 km por carretera entre Barranquilla y Santa Marta. Las cargas ambientales de este transporte se obtienen de SimaPro. Para el cálculo de las emisiones directas asociadas al proceso se tuvo en cuenta el agua de desecho, metanol y glicerol como emisiones al agua y residuos de aceite como flujos finales de residuos.

**Figura 34. Diagrama del proceso del proceso de producción de biodiesel.**

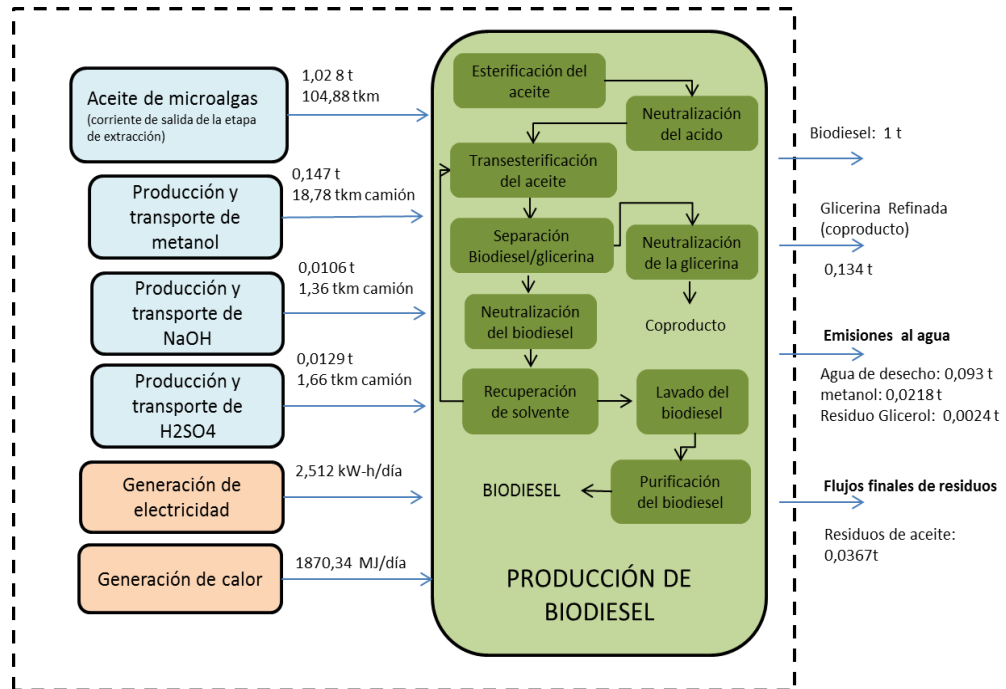


En la figura 35 se muestra el diagrama de flujo esquemático del proceso de producción de biodiesel donde se describe cada una de las entradas, salidas y emisiones consideradas dentro del inventario de este sistema, cada una de ellas están vinculadas a la unidad funcional.

**2.6.2.6. Transporte y distribución:** El biodiesel producido se transporta mediante camión cisterna al depósito de almacenamiento. La distancia recorrida por el camión en el trayecto se ha calculado como las distancias entre las plantas de producción y el depósito con un valor de 236 kilómetros para su distribución.

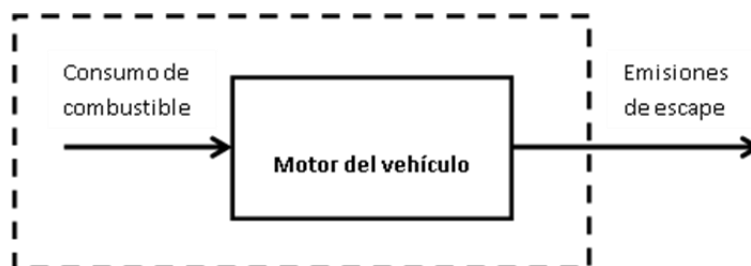
El biodiesel producido se supuso que se distribuye directamente a las estaciones de servicio que ofrecen la posibilidad de repostar el combustible puro.

**Figura 35. Diagrama de bloque de las entradas y salidas del proceso de producción de biodiesel.**



**2.6.2.7. Uso final del biocombustible estudiado:** Los datos de consumos de combustible del vehículo seleccionado usando biodiesel, así como algunos de los gases contaminantes emitidos por el escape se han obtenido del estudio “Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte. Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo de Biodiesel y Diésel” [129]. En la figura 36 se muestra el esquema del proceso de uso del biocombustible.

**Figura 36. Esquema del proceso de consumo de combustible.**



En el marco de este estudio se consideró que el Ford Focus de cilindrada 1,8 cc es un vehículo representativo del vehículo mayoritario en que se va a consumir el biodiesel en el ámbito temporal de este estudio. Este vehículo es capaz de consumir mezclas variables de biodiesel y diésel incluso funciona con biodiesel puro [129]. Por tanto el vehículo de referencia para este estudio es el Focus 1.8 TD di 90 CV, las características del vehículo son las siguientes:

- Aceleración 0-100 km/h
- Velocidad máxima: 180 km/h
- Peso del vehículo: 1288 kg
- Potencia máxima: 66kW (90CV) a 4000 rpm
- Par máximo: 200 Nm a 2000 rpm

El motor del vehículo consume combustible y genera la potencia necesaria para mover el vehículo. Este proceso genera unas emisiones de gases de efecto invernadero que se emiten a través del tubo de escape. Los datos de consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub> del vehículo de referencia cuando usa biodiesel puro han sido reportados por Lechón et al. (2007) [129], donde el consumo de biocombustible es 0,05747 l/km y las emisiones de gases de efecto invernadero del tubo de escape del vehículo de referencia son: N<sub>2</sub>O con 0,0132 g/km, CO<sub>2</sub> con 142,38 g/km y CH<sub>4</sub> con 0,0117 g/km y estos datos se han usado para este estudio.

**2.6.2.8. Procedimiento de asignación de impactos:** Como fue comentado en apartados anteriores, la biomasa de microalgas es fuente de materias primas de diversos procesos. En el caso específico de la obtención de aceites a partir de microalga, se generan una serie de co-productos que dado sus propiedades pueden ser considerados como fuente de materia prima en diversas aplicaciones [132].

Por otra parte, y de acuerdo con la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, en los procesos multiproducto, es decir, en aquellos en los cuales existen diversos productos como resultado del proceso productivo, es necesario asignar a cada producto la contribución que aporta en el total de impactos identificados. Para realizar la asignación tanto de consumos energéticos como de emisiones entre los coproductos obtenidos que aparecen en el ciclo de vida del biodiesel de microalgas de cada uno de los escenarios, se ha seguido el criterio de asignación basado en el contenido energético de los productos originados que es una de las más reconocidas formas de asignación.

En cada uno de los escenarios evaluados del proceso de producción de biodiesel se obtuvo como co-productos la biomasa libre de lípidos (BLL) extraída del proceso de extracción de aceite y la glicerina del proceso de esterificación/transesterificación.

En este trabajo de investigación, para determinar el contenido energético de los productos obtenidos en el ciclo de biodiesel se realizó a través del poder calorífico inferior (PCI). Para esto, el PCI de la microalga total se utiliza para calcular la energía renovable contenida en las microalgas. Es necesario considerar la BLL sobre una base energética y de igual manera la glicerina que son los coproductos obtenidos.

La biomasa contiene proteínas, carbohidratos y lípidos. El PCI de las macromoléculas de acuerdo con Lardon et al. (2009) [61] ha sido usado para calcular el PCI de la biomasa total y de la BLL (ver tabla 18). La BLL se calcula mediante la aproximación de que todos los lípidos se eliminan de la biomasa. Si las fracciones en peso de proteínas, carbohidratos, y lípidos son  $f_P$ ,  $f_C$ , y  $f_L$  (valores calculados a partir de la tabla 8) y los correspondientes PCI son  $C_P$ ,  $C_C$  y  $C_L$ . El PCI de la BLL y de la biomasa total (BT) de microalgas fue estimado de la siguiente manera [133]:

$$PCI (BLL) = \frac{(f_p * C_p + f_c * C_c)}{(f_p + f_c)} \quad (10)$$

$$PCI (BT) = (f_p * C_p + f_c * C_c + f_L * C_L) \quad (11)$$

**Tabla 18. Poder calorífico inferior para las macromoléculas [61].**

Compuesto	PCI MJ/kg
Proteínas	15,5
carbohidratos	13
lípidos	38,3

Los valores de poder calórico inferior para BLL y la biomasa total (BT) fueron calculados a partir de las ecuaciones 10 y 11 y estos son:

$$BLL=14,54 \text{ MJ/kg} \quad ; \quad BT = 20,94 \text{ MJ/kg.}$$

En la tabla 19 se presenta la asignación energética (%) que se realizó para cada uno de los escenarios, donde los escenarios 1, 2 y 3 presentan la misma asignación energética debido a que estos procesos tienen el mismo sistema de extracción por lo tanto la misma cantidad de BLL. Se asumió un poder calorífico PCI para la glicerina de 16 MJ/kg [126].

En la tabla 19 se puede observar que los escenarios 1, 2, 3 y 4 presentan aproximadamente el mismo % de asignación energética ya que esta depende de la cantidad de producto que se extrae de BLL y para todos los casos es prácticamente el mismo valor, igualmente esto es debido a que en estos escenarios el proceso de extracción de aceite es por medio de la misma tecnología, solo variando la cantidad de hexano como solvente.

**Tabla 19. Porcentajes de asignación en base al contenido energético de los co-productos obtenidos en el proceso de biodiesel para cada uno de los escenarios estudiados.**

Escenarios	Productos - Coproductos	kg/kg biodiesel	PCI (MJ/kg)	MJ	%
Escenario 1, 2 y 3	BLL	2,220	14,54	32,28	44,69
	Biodiesel	1	37,8	37,8	52,33
	Glicerina	0,134	16	2,15	2,97
Escenario 4	BLL	2,221	14,54	32,29	42,80
	Biodiesel	1	37,8	37,8	52,33
	Glicerina	0,134	16	2,15	2,97
Escenario 5	BLL	2,29	14,54	33,24	45,42
	Biodiesel	1	37,8	37,8	51,65
	Glicerina	0,134	16	2,15	2,93
Escenario 6	BLL	2,23	14,54	32,43	44,81
	Biodiesel	1	37,8	37,8	52,23
	Glicerina	0,134	16	2,15	2,97

**2.6.3 Evaluación de impactos e interpretación de resultados.** Las categorías de impacto más representativas a la hora de realizar un estudio de ACV de sistemas energéticos son; Potencial de calentamiento global (PCG), por la cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero; y la de consumo de energía fósil. No obstante en este estudio, se ha calculado otras cuatro categorías de impacto que se van a considerar en este apartado, entre las cuales se encuentra Acidificación (ACD), Eutrofización (EUT), Agotamiento de la Capa de Ozono (ACO) y precursores de foto-oxidantes químicos o Formación de Ozono Troposférico (FOT).

Considerando las recomendaciones de los diferentes métodos de evaluación de impacto (normativa ISO 14040/44 de 2006) [134, 135] se acordó para la realización de la evaluación de inventario y la evaluación de impactos ambientales:

- Realizar solamente las etapas de clasificación y caracterización, debido al enorme grado de subjetividad que conlleva las dos siguientes etapas; Normalización y valoración.
- Seleccionar las categorías de impacto (seleccionadas anteriormente) y métodos de evaluación.

### 3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS DEL ACV

Para el desarrollo de este apartado, los resultados son separados en dos partes. Por un lado, los resultados del análisis de inventario los cuales permiten observar la incidencia de cada flujo de entrada y salida en las categorías de impacto para cada proceso unitario. Y por otro lado, los resultados de la evaluación del impacto que muestran la variación de impacto para cada uno de los escenarios estudiados.

#### 3.1. RESULTADOS DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

A continuación se presentan los resultados del inventario de emisiones de cada proceso unitario que envuelve la cadena de producción de biodiesel de microalgas en cada categoría de impacto.

**3.1.1. Potencial de Calentamiento Global (PCG).** En cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se presentan los resultados del inventario realizado para el CO<sub>2</sub>, el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y el metano (CH<sub>4</sub>) para cada una de las etapas que involucran el proceso de producción de biodiesel. Para el cálculo de las emisiones de este tipo de gases en equivalentes de CO<sub>2</sub> se han utilizado los siguientes factores de caracterización, que expresan el potencial de calentamiento global de cada una de las sustancias consideradas. Los potenciales usados se muestran en la tabla 20.

**Tabla 20. Potenciales de calentamiento global (horizonte temporal de 100 años).**

Compuesto	Factores de caracterización (kg CO <sub>2</sub> eq/kg)
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	25
N <sub>2</sub> O	298
CO	1.53

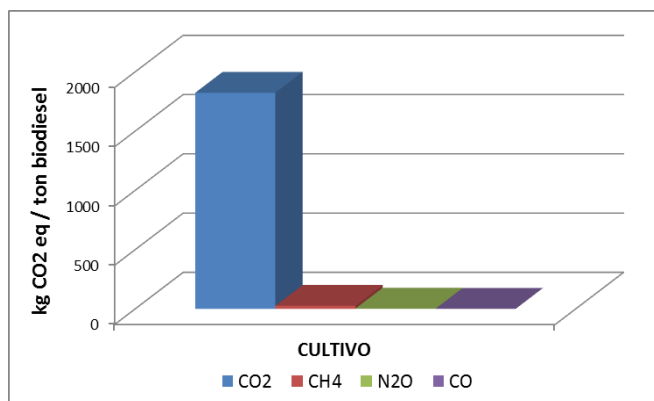
Fuente: IPCC 2006 [136]

El inventario de emisiones de los diferentes gases que contribuyen al efecto invernadero en las distintas unidades del proceso de producción de biodiesel se muestran a continuación:

De forma gráfica, la figura 37 presenta la contribución de la etapa del cultivo para la categoría de impacto PCG, donde se observa que la emisión de CO<sub>2</sub> presenta el valor más alto para esta categoría de impacto seguido por el CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO con emisiones bajas comparadas con el CO<sub>2</sub>.

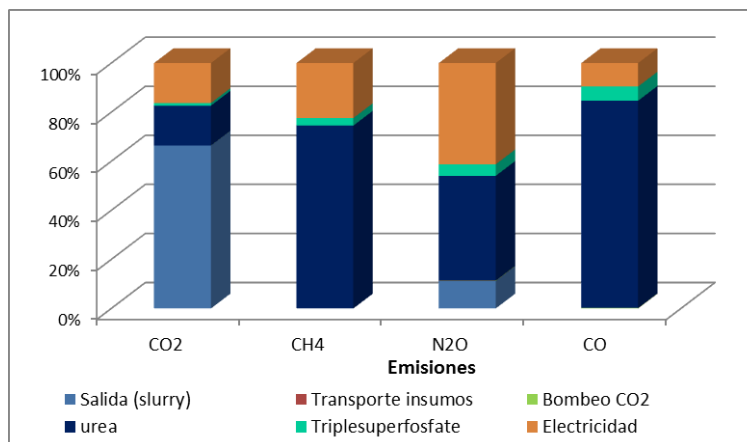
Las emisiones de CO<sub>2</sub> se deben principalmente a la corriente que se define como producto dentro del escenario (corresponde a los valores de las emisiones al aire, agua y suelo definidas en la etapa del cultivo) en este caso llamada salida de slurry, esto puede observarse en la figura 38 donde la salida de slurry representa el 66,35% de la emisión de CO<sub>2</sub> seguido por el uso de la electricidad, el uso de la urea y el uso del triplesuperfosfato en un 16,31%, 16,23% y 1,07% respectivamente. El transporte de insumos presenta un porcentaje de emisión bajo alrededor del 0,040%. De igual manera, se observa que para la emisión de CH<sub>4</sub> el mayor contribuyente es el uso de urea en un 74,41%, seguido por el uso de electricidad en un 22,53% y el uso de triplesuperfosfato en un 3,06%.

**Figura 37. Emisiones de Gases de efecto invernadero para la etapa de cultivo de microalgas para la producción de biodiesel.**



Se observa que para la emisión de N<sub>2</sub>O el mayor contribuyente es el uso de electricidad con un 47,22%, precedido por el uso de urea en un 38,38%, por las emisiones definidas en el sistema (salida slurry) en un 10,06%, por el uso de triplesuperfosfato en un 4,21% y el transporte de insumos presenta un porcentaje de emisión bajo alrededor del 0,13%. Las emisiones de GEI para el CO se muestra que el mayor contribuyente es el uso de la urea en el sistema con un 84,18%, seguido por el uso de la electricidad en un 9,87% y por el uso de triplesuperfosfato en un 5,77%, el transporte de insumos presenta un porcentaje de emisión bajo se encuentra alrededor del 0,14%.

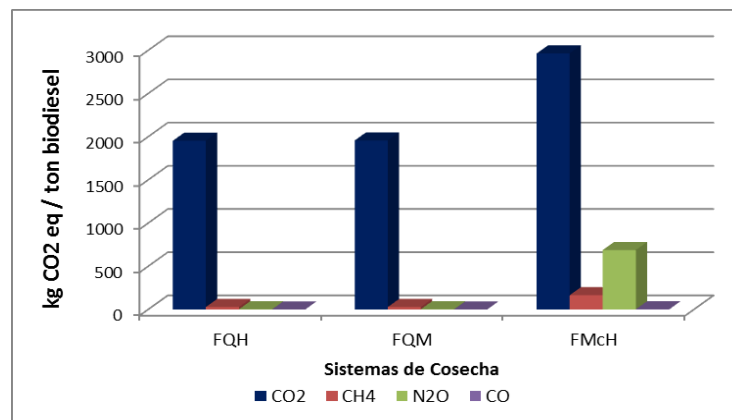
**Figura 38. Porcentaje de emisiones del inventario de la etapa de cultivo de microalgas para la producción de biodiesel.**



La figura 39 presenta la contribución de la etapa de recolección de biomasa o cosecha de biomasa para la categoría de impacto de PCG, donde se observa que la emisión de CO<sub>2</sub> presenta el valor más alto, seguido por las emisiones de N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> y CO con valores de emisión más bajo que el CO<sub>2</sub>.

El sistema de recolección de biomasa por el método de FMcH presenta las mayores emisiones tanto de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O comparado con los métodos de FQM y FQH mostrados en la figura 39. La mayor contribución de emisiones de CO<sub>2</sub> para FMcH se debe principalmente a las cargas que traen la corriente de entrada de biomasa (slurry) de microalgas proveniente de la etapa de cultivo, precedido por el uso de la anilina con porcentajes de 61,52% y 35,62% respectivamente. Las emisiones de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO el mayor contribuyente es el uso de la anilina con valores de 83,58%, 99,51% y 73,80%, seguido por la entrada de slurry de microalgas que proviene del cultivo.

**Figura 39. Emisiones de GEI para los tres sistemas de recolección de biomasa de microalgas FQH, FQM y FMcH.**



La tabla 21 muestra el inventario de emisiones para este sistema de recolección de biomasa:

**Tabla 21. Inventario de las emisiones de GEI para el método de FMcH para producir 1 ton de biodiesel. (kg/ton biodiesel).**

<b>Emisiones</b>	<b>Producto slurry 1</b>	<b>Biomasa del cultivo</b>	<b>Anilina</b>	<b>Transporte de insumos</b>	<b>Electricidad</b>	<b>Total</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	0	1823,671	1056,503	0,263	84,450	2964,886
<b>CH<sub>4</sub></b>	0	1,024	5,551	0	0,065	6,640
<b>N<sub>2</sub>O</b>	0	0,009	2,303	0	0,001	2,313
<b>CO</b>	0	0,620	1,805	0,001	0,017	2,443

Los métodos de FQH y FQM presentan una contribución de emisiones aproximadamente iguales ya que usan los mismos insumos y el transporte de estos, la diferencia radica en la cantidad de energía eléctrica usada en cada método de floculación, ya que uno es hidráulico y el otro mecánico. En las tablas 22 y 23 se muestra el inventario de emisiones para estos dos métodos de recolección de biomasa.

**Tabla 22. Inventario de las emisiones de GEI para el método de FQM para producir 1 ton de biodiesel. (kg/ton biodiesel).**

<b>Emisiones</b>	<b>Producto slurry 1</b>	<b>Biomasa del cultivo</b>	<b>Sulfato de aluminio</b>	<b>Transporte de insumos</b>	<b>Electricidad</b>	<b>Total</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	0	1823,671	90,493	0,131	43,515	1957,810
<b>CH<sub>4</sub></b>	0	1,024	0,136	0,000	0,034	1,194
<b>N<sub>2</sub>O</b>	0	0,009	0,002	0,000	0,001	0,012
<b>CO</b>	0	0,620	0,084	0,000	0,009	0,713

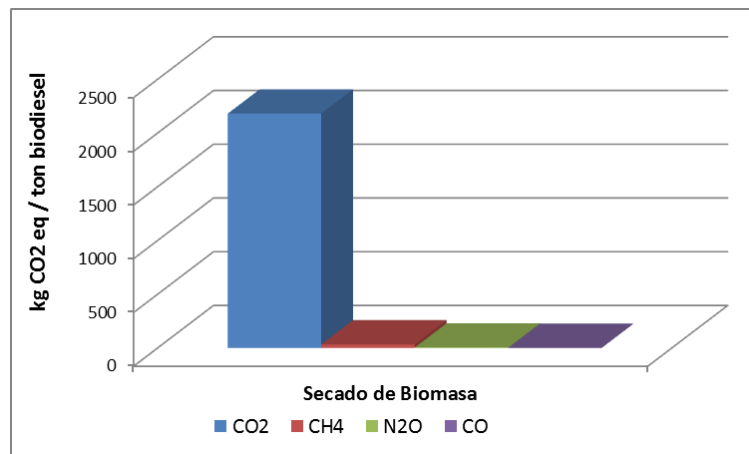
**Tabla 23. Inventario de las emisiones de GEI para el método de FQH para producir 1 ton de biodiesel. (kg/ton biodiesel).**

<b>Emisiones</b>	<b>Producto slurry 1</b>	<b>Biomasa del cultivo</b>	<b>Sulfato de aluminio</b>	<b>Transporte de insumos</b>	<b>Electricidad</b>	<b>Total</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	0	1823,671	90,493	0,131	39,700	1953,995
<b>CH<sub>4</sub></b>	0	1,024	0,136	0,000	0,031	1,191
<b>N<sub>2</sub>O</b>	0	0,009	0,002	0,000	0,000	0,012
<b>CO</b>	0	0,620	0,084	0,000	0,008	0,712

La mayor contribución de emisiones de CO<sub>2</sub> para FQH y FQM se debe principalmente a las cargas que traen la corriente de entrada de biomasa (slurry) de microalgas proveniente de la etapa de cultivo, precedido por el uso del sulfato de aluminio y el transporte con porcentajes de 93,33% y 4,63% y 2,032% respectivamente.

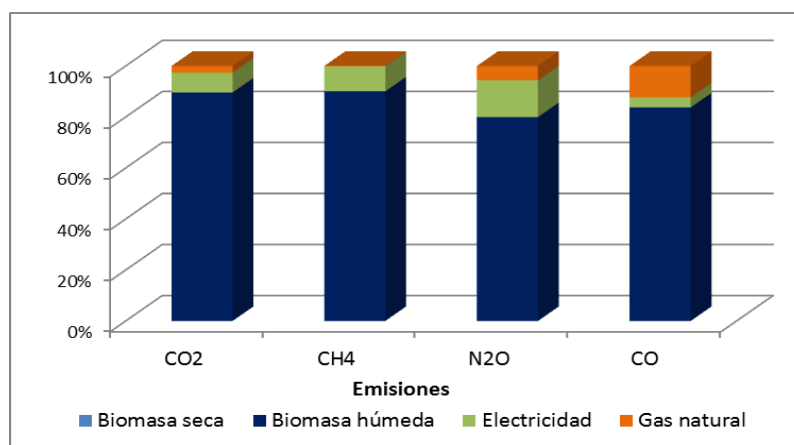
La figura 40 presenta la contribución del proceso secado de biomasa para la categoría de impacto de PCG, donde se observa que la emisión de CO<sub>2</sub> presenta el valor más alto para esta categoría de impacto seguido por el CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO con emisiones bajas comparadas con el CO<sub>2</sub> emitido.

**Figura 40. Emisiones de GEI para el proceso de secado de biomasa de microalgas.**



Las emisiones de CO<sub>2</sub> se deben principalmente a las cargas que trae la corriente que se define como biomasa húmeda que es la corriente que ingresa al proceso de secado, esto puede apreciarse en la figura 41 donde la biomasa húmeda representa el 89,61% de la emisión de CO<sub>2</sub> seguido por el uso de la electricidad y el uso de gas natural para generar el calor en el secado estos contribuyen en un 7,76% y 2,63% respectivamente.

**Figura 41. Porcentaje de emisiones del inventario del proceso de secado de biomasa de microalgas.**

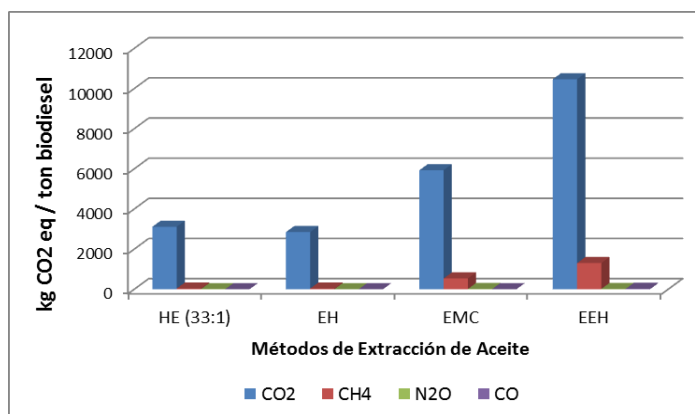


De igual manera, se observa que para la emisión de CH<sub>4</sub> el mayor contribuyente es la corriente de biomasa húmeda con un 90,03 %, seguido por el uso de electricidad en un 9,89% y el uso de gas natural con menos del 1%.

Las emisiones de GEI de N<sub>2</sub>O y CO muestran que la mayor contribución es debida a la biomasa húmeda que ingresa al sistema con 79,97% y 83,71% respectivamente. Otras contribuciones para la emisión de N<sub>2</sub>O son por el uso de la electricidad y uso de gas natural en un 14,40% y 5,63% y para la emisión de CO es igualmente por el uso de gas natural y electricidad pero con diferentes porcentajes en este caso 3,97% y 12,32%.

La figura 42 presenta la contribución de los diferentes métodos de extracción de aceite de microalgas para la categoría de impacto de PCG, donde se observa que la emisión de CO<sub>2</sub> presenta el valor más alto para esta categoría de impacto seguido por el CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO con emisiones bajas comparadas con la emisión de CO<sub>2</sub> para los cuatro sistemas de extracción de aceite, donde el sistema de EEH es el que genera mayores emisiones de CO<sub>2</sub> seguido por EMC, HE (33:1) y EH.

**Figura 42. Emisiones de GEI para los cuatro sistemas de extracción de aceite de microalgas analizados en este documento.**



La mayor contribución de emisiones de CO<sub>2</sub> para el método de EEH se debe principalmente al uso de etanol que contribuye en un 70,65%, estas emisiones se derivan normalmente de los combustibles fósiles; por otro lado otro contribuyente es la corriente de entrada de biomasa seca que carga las emisiones de las etapas anteriores (cultivo, cosecha y secado) en un 23,15% y por el uso de gas natural en un 5,94%. Para el método de EMC el mayor contribuyente es el uso de metanol en un 50,97%, seguido por las cargas de la corriente de entrada de biomasa seca en un 40,84% y por el uso de gas natural en un 7,8%, las demás entradas generan emisiones menores al 1%.

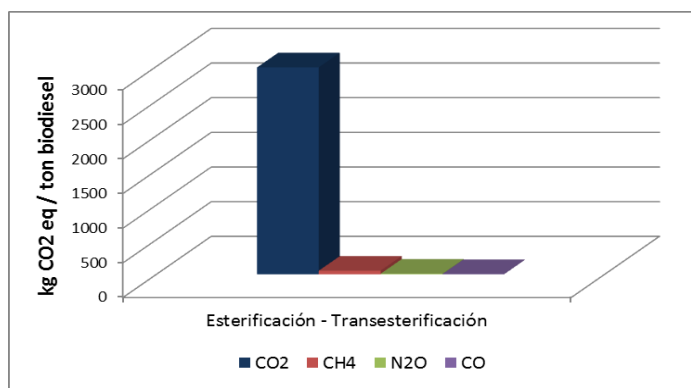
La emisión de CH<sub>4</sub> para los métodos de EEH y EMC son contribuidos por el uso de etanol en un 97,13% y el metanol en un 93,08% respectivamente. Las emisiones de N<sub>2</sub>O y CO son debidos al uso de etanol, a las cargas que trae la corriente de biomasa húmeda y al uso de gas natural (52,29%, 28,79% y 15,81%; 84,52%, 6,82% y 8,2%) para el método de EEH y para el método de EMC es debido al uso de metanol, a las cargas que trae la biomasa húmeda y al uso de gas natural. La tabla 24 y 25 muestra el inventario de emisiones para los sistemas de EEH y EMC.

En las tablas 26 y 27 se muestra el inventario de emisiones para los métodos de EH y HE 33:1, ambos tienen la particularidad que usan las mismas materias primas solo presenta una gran diferencia en el requerimiento de energía. La mayor contribución de CO<sub>2</sub> para los dos métodos es debida a la corriente de ingreso de biomasa seca ya que esta trae las cargas de los procesos de cultivo, cosecha y secado.

El uso de gas natural para generación de calor en el proceso de extracción es el segundo contribuyente de emisiones de CO<sub>2</sub>. Igualmente, la contribución de emisiones de CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO es debida al uso de gas natural y a la corriente de biomasa seca. También se observa que el uso de hexano y de electricidad genera emisiones por debajo del 1%, mientras que el transporte de insumos genera emisiones de N<sub>2</sub>O y CO alrededor del 6% y 3% para ambos casos.

La figura 43 presenta la contribución del sistema de producción de biodiesel para la categoría de impacto de PCG, donde se observa que la emisión de CO<sub>2</sub> presenta el valor más alto para esta categoría de impacto seguido por el CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y CO. Las emisiones de CO<sub>2</sub> se deben principalmente a las cargas que vienen en la corriente de entrada de aceite al sistema, que representan el 95,4% de la contribución y un 3,1% por el uso de metanol.

**Figura 43. Emisiones de GEI para el proceso de esterificación – transesterificación de aceite para producir biodiesel de microalgas.**



Las emisiones de CH<sub>4</sub> en esta etapa son debidas igualmente a las cargas que vienen con la extracción del aceite y el uso de metanol en 70,4% y 29,5% respectivamente. Para las emisiones de N<sub>2</sub>O y CO son debidas a la entrada de aceite, al uso de electricidad y al uso de metanol.

**Tabla 24. Inventario de las emisiones de GEI para el método de EEH. (kg/ton biodiesel).**

<b>Emisiones</b>	<b>Aceite extraído</b>	<b>Biomasa seca</b>	<b>Hexano</b>	<b>Transporte de insumos</b>	<b>Etanol</b>	<b>Agua</b>	<b>Gas natural</b>	<b>Electricidad</b>	<b>Total</b>
CO <sub>2</sub>	0	2422,242	1,18598	16,865	7393,369	8,681	621,636	0,379	10464,36
CH <sub>4</sub>	0	1,469	0,00379	0	50,731	0,0147	0,0107	0,00029	52,23
N <sub>2</sub> O	0	0,016	0,00002	0,0015	0,0299	0,00023	0,0091	0	0,0571
CO	0	0,945	0,00196	0,0495	11,707	0,0119	1,136	0,00008	13,85

**Tabla 25. Inventario de las emisiones de GEI para el método de EMC. (kg/ton biodiesel).**

<b>Emisiones</b>	<b>Aceite extraído</b>	<b>Biomasa seca</b>	<b>Cloroformo</b>	<b>Transporte de insumos</b>	<b>Metanol</b>	<b>Agua</b>	<b>Gas natural</b>	<b>Electricidad</b>	<b>Total</b>
CO <sub>2</sub>	0	2422,242	1,765	16,640	3023,225	3,921	462,397	0,955	5931,144
CH <sub>4</sub>	0	1,469	0,005	0,000	20,036	0,007	0,008	0,001	21,525
N <sub>2</sub> O	0	0,016	0,000	0,002	0,023	0,000	0,007	0,000	0,048
CO	0	0,945	0,002	0,049	2,044	0,005	0,845	0,000	3,890

**Tabla 26. Inventario de las emisiones de GEI para el método de EH. (kg/ton biodiesel).**

<b>Emisiones</b>	<b>Aceite extraído</b>	<b>Biomasa seca</b>	<b>Hexano</b>	<b>Transporte de insumos</b>	<b>Gas natural</b>	<b>Electricidad</b>	<b>Total</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	0	2411,950	2,638	14,918	417,521	1,611	2848,638
<b>CH<sub>4</sub></b>	0	1,4629	0,0084	0,0000	0,0072	0,0012	1,4798
<b>N<sub>2</sub>O</b>	0	0,0164	0	0,0013	0,0061	0	0,0238
<b>CO</b>	0	0,9408	0,0044	0,0438	0,7629	0,0003	1,7521

**Tabla 27. Inventario de las emisiones de GEI para el método de HE 33:1. (kg/ton biodiesel).**

<b>Emisiones</b>	<b>Aceite extraído</b>	<b>Biomasa seca</b>	<b>Hexano</b>	<b>Transporte de insumos</b>	<b>Gas natural</b>	<b>Electricidad</b>	<b>Total</b>
<b>CO2</b>	0	2411,44	2,6259	14,915	685,164	2,782	3116,928
<b>CH4</b>	0	1,46	0,0084	0,0000	0,012	0,0022	1,485
<b>N2O</b>	0	0,02	0,0000	0,0013	0,010	0,0000	0,028
<b>CO</b>	0	0,94	0,0043	0,044	1,252	0,0006	2,241

**3.1.2. Categoría de Consumo de Energía Fósil.** En la figura 44 se muestra los resultados de los consumos de energía fósil en MJ para producir una tonelada de biodiesel desglosados por cada etapa (PCI de 37,8 MJ/kg para el biodiesel [61]). Donde se observa que los cuatro procesos de extracción estudiados presenta los mayores requerimientos de energía, siendo EH el de menor requerimiento de energía con 72625,31 MJ por ton de biodiesel, seguido por los métodos HE 33:1 con 119082,76 MJ por ton biodiesel, EMC con 178125,21 MJ por ton biodiesel y el de mayor consumo de energía está dado por el método de EEH con 293067,30 MJ por ton biodiesel.

De forma gráfica, la figura 45a muestra los requerimientos de energía en MJ de energía fósil por ton de biodiesel para cada método de extracción, los cuales esta compuestos por: extracción de aceite (separación de biomasa/aceite), BLL (biomasa libre de lípidos, coproducto) y recuperación de solvente, los resultados indican que los requerimientos energéticos de los procesos de extracción en cada caso se deben principalmente a la recuperación de solventes. Este consumo es específicamente debido a la cantidad de energía térmica que debe usarse como servicios industriales.

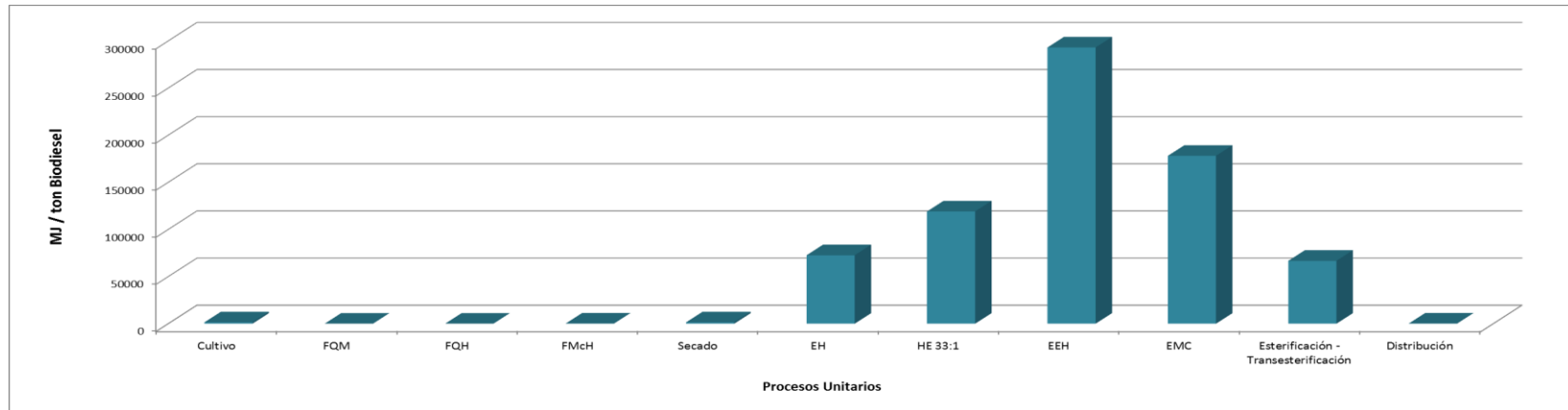
La figura 45b muestra el consumo de energía del proceso de recolección de biomasa o cosecha de biomasa donde se evidencia que el mayor consumo es generado por el método de FMcH con un valor de 166,57 MJ por ton de biodiesel, mientras que los métodos de FQM y FQH tienen consumos de energía muy cercanos (82,414MJ por ton biodiesel y 78,426 MJ por ton biodiesel) y estos son más bajos comparado con el método de FMcH. La siguiente tabla muestra los resultados de los consumos de energía para producir una tonelada de biodiesel para cada etapa.

**Tabla 28. Consumo energético de cada una de las etapas analizadas en la cadena de producción de biodiesel (MJ energía fósil/ton biodiesel).**

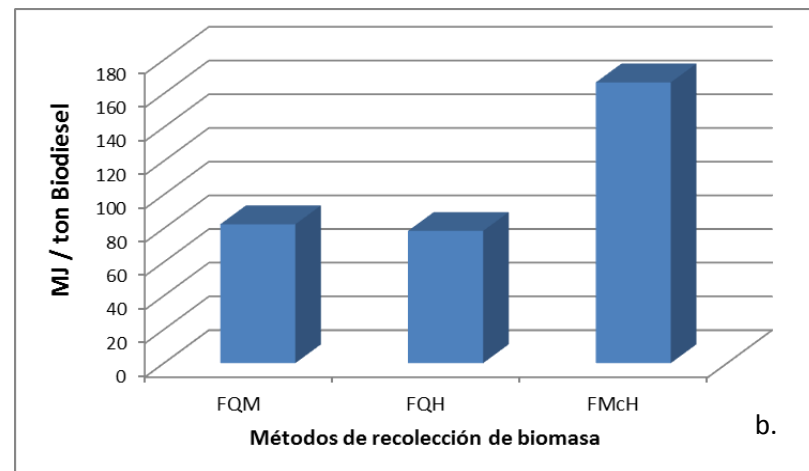
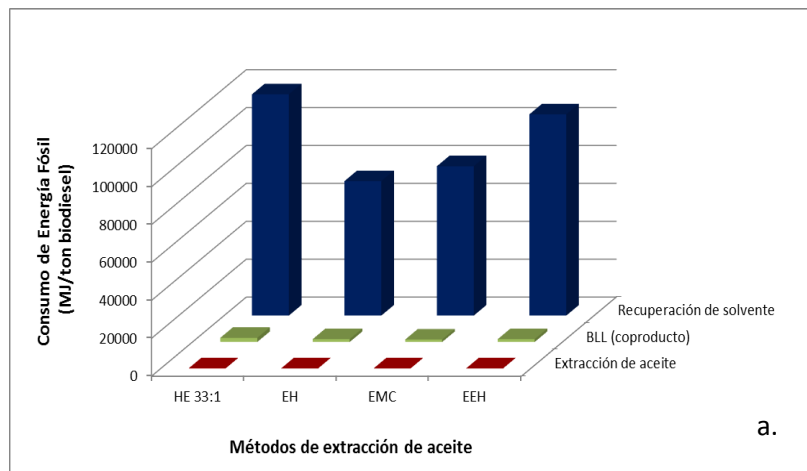
<b>Etapas</b>	<b>Consumo Energético</b>
<b>Cultivo</b>	1434,109
<b>FQM</b>	82,414
<b>FQH</b>	78,426
<b>FMcH</b>	166,572
<b>Secado</b>	1471,193
<b>EH</b>	72625,31
<b>HE 33:1</b>	119082,76
<b>EEH</b>	293067,30
<b>EMC</b>	178125,21
<b>Esterificación – Transesterificación</b>	66729,75
<b>Distribución</b>	183,24

Finalmente, se presentan los resultados de las emisiones del inventario de cada una de los procesos unitarios para las otras cuatro categorías de impacto según el método EPD (2007).

**Figura 44. Consumo de energía en las etapas de producción de producción de biodiesel (contiene cada uno de los métodos de recolección de biomasa y de extracción de aceite estudiados).**



**Figura 45. Consumo de energía para las etapas: a. extracción de aceite de microalgas, b. Recolección de biomasa de microalgas.**



**3.1.3. Acidificación (ACD).** En cuanto a las emisiones para la categoría de ACD se presentan los resultados del inventario realizado para las emisiones de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_x$ , sobre cada una de las etapas que involucran el proceso de producción de biodiesel.

La distribución de las diferentes emisiones que contribuyen a la categoría de ACD en las distintas etapas del proceso pueden observarse en la figura 46 las emisiones generadas para la etapa de cultivo, en la figura 47a y b para cada uno de los métodos estudiados de las etapas de recolección de biomasa y extracción de aceite y en la figura 48 a y b para el proceso de secado de biomasa y en la figura 48c para el proceso de esterificación y transesterificación.

A partir de la figura 46a se evidencia que el mayor contribuyente de emisiones contaminantes en esta categoría de impacto para la etapa de cultivo es el  $\text{SO}_2$  con un 45%, seguido por  $\text{NO}_x$  y  $\text{NH}_3$  con 37% y 17%, mientras que las emisiones de  $\text{SO}_x$  son del 2%. Estas emisiones contaminantes se deben principalmente al uso de urea, al uso de triplesuperfosfato y al uso de electricidad cada una de ellas con una distribución porcentual de 44%, 31% y 26% respectivamente. Las emisiones de  $\text{NH}_3$  se deben prácticamente al uso de urea en un 99,2% y las emisiones de  $\text{SO}_x$  al uso de electricidad en un 97,2% y al bombeo de  $\text{CO}_2$  en un 2,6% como puede se puede evidenciar en la figura 46b.

En la figura 47a se muestra los procesos de recolección de biomasa y el que en mayor medida contribuye a la emisión del contaminante  $\text{SO}_2$  en esta categoría de impacto son FQM y FQH. Estas emisiones son debidas al uso de sulfato de aluminio y a las cargas que vienen atribuidas a la corriente de slurry de biomasa que ingresa a la cosecha proveniente del cultivo, de igual manera son las causantes de las emisiones contaminantes de  $\text{NH}_3$  y  $\text{NO}_x$ . Mientras que las emisiones de  $\text{SO}_x$  son atribuidas al uso de electricidad pero principalmente a la cargas que vienen en la corriente de slurry de microalgas. El método de FMcH

presenta en una menor proporción estas emisiones contaminantes, las emisiones de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_2$  se atribuyen a este caso igualmente a la corriente de slurry de microalgas y por otro lado al uso de la anilina y al uso de electricidad. El proceso de extracción de aceite que en mayor medida contribuye a las emisiones de esta categoría de impacto es EEH, el resto de los procesos tienen una contribución menor como se muestra en la figura 47b.

En el proceso de secado las emisiones contaminantes que presentan una mayor impacto como los casos anteriores es el  $\text{SO}_2$  seguido por el  $\text{NO}_x$  como se muestra en la figura 48a. La contribución de los contaminantes  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{NH}_3$  es causada principalmente por la corriente de ingreso de biomasa húmeda. El uso de gas natural genera emisiones de  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$  como se muestra en la figura 48b. Las mayores emisiones contaminantes generadas en el proceso de Esterificación – transesterificación en esta categoría de impacto son  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{SO}_x$ , mientras que el  $\text{NH}_3$  tiene una menor contribución como se muestra en la figura 48c.

Figura 46. Inventario de emisiones del proceso de cultivo de microalgas para la categoría de impacto de Acidificación.

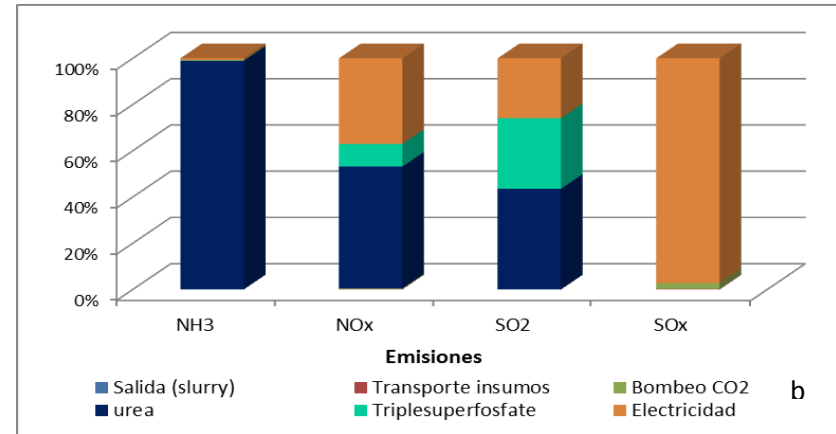
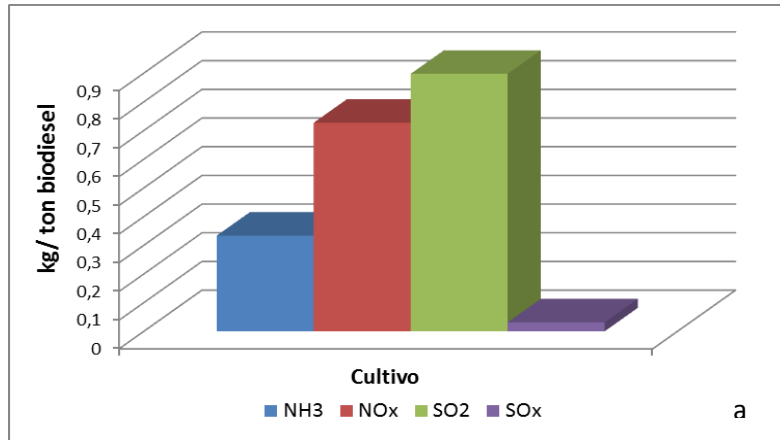
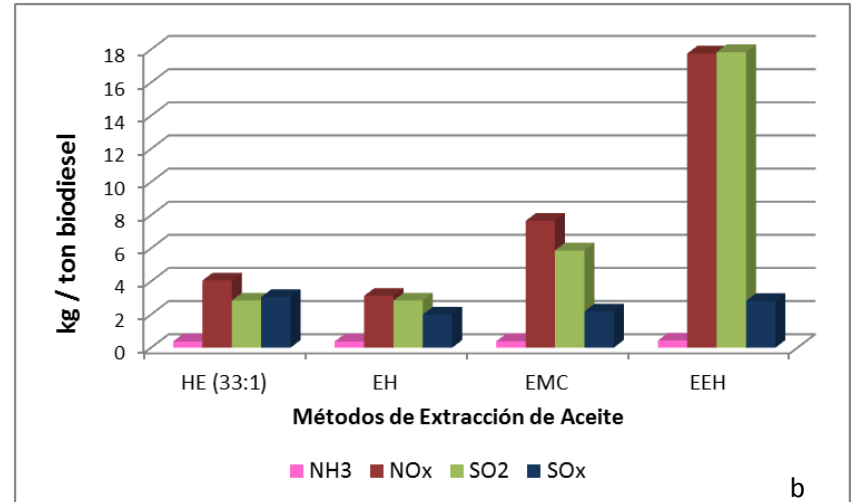
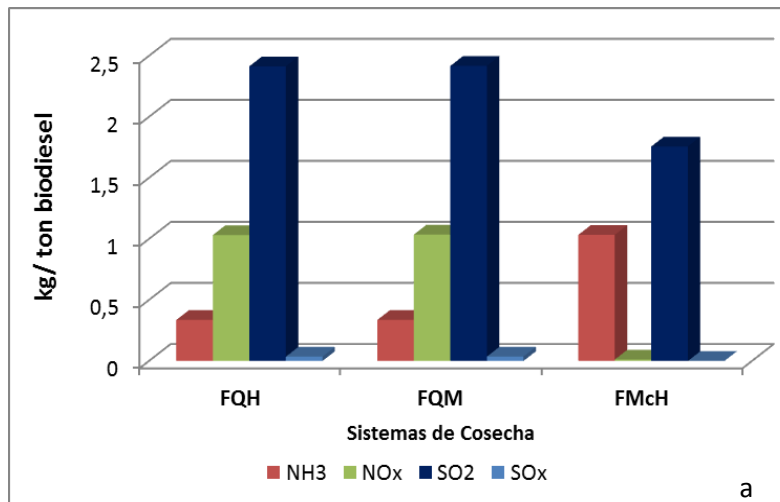
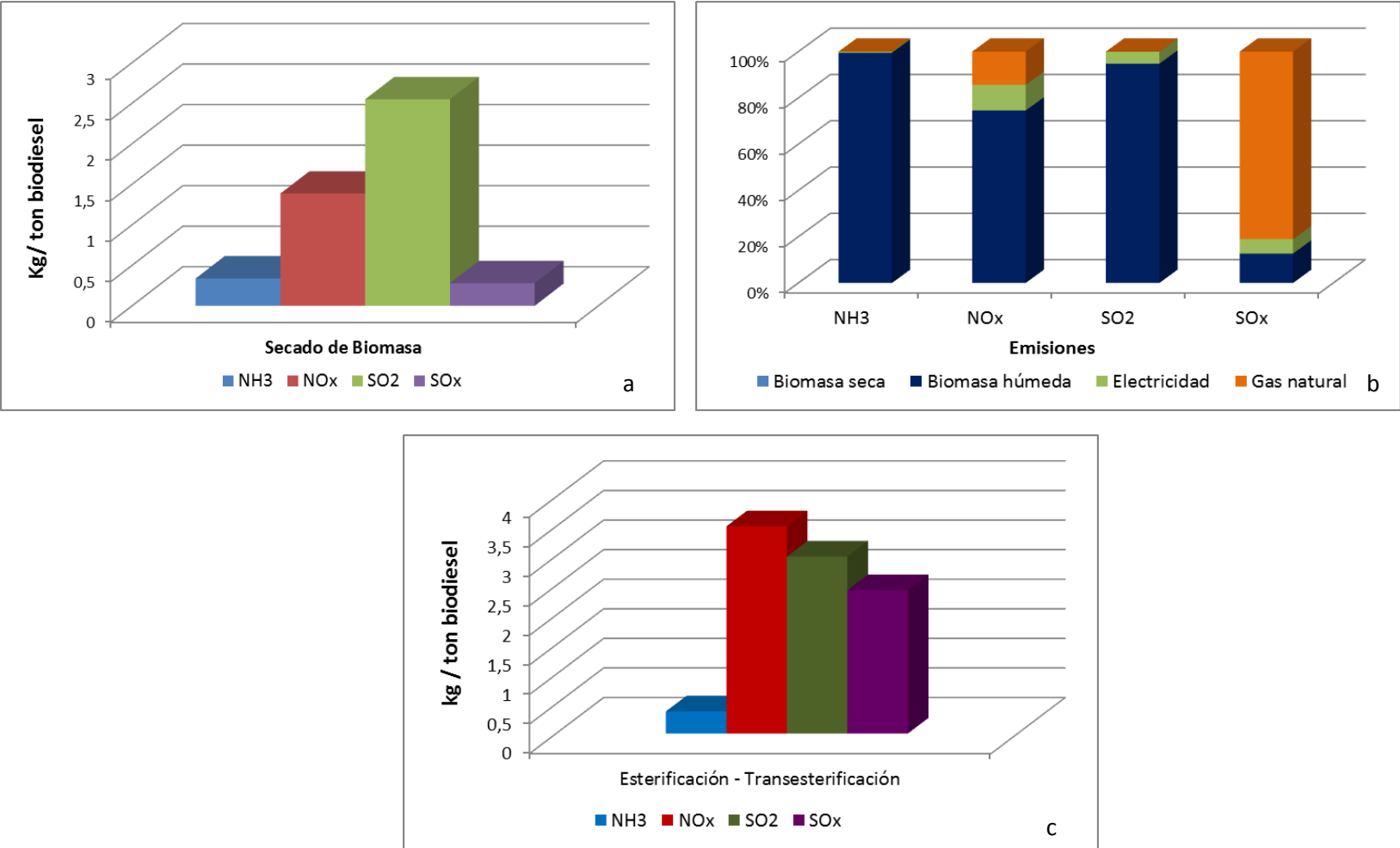


Figura 46. Inventario de emisiones de la categoría de impacto de Acidificación para: a. procesos de recolección de biomasa. b. procesos de extracción de aceite de microalgas.



**Figura 47. Inventario de emisiones de la categoría de impacto de Acidificación para: a y b. Proceso de secado de biomasa de microalgas. c. Proceso de esterificación – transesterificación de aceite de microalgas.**



**3.1.4. Eutrofización (EUT).** En cuanto a las emisiones para la categoría de EUT se presentan los resultados del inventario realizado para las emisiones contaminantes de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_3$ , N y P, sobre cada una de las etapas que involucran el proceso de producción de biodiesel.

La distribución de las diferentes contaminantes que contribuyen a la EUT en las distintas etapas del proceso pueden observarse: en la figura 49 a y b las emisiones generadas para la etapa de cultivo, en la figura 50a para cada uno de los métodos estudiados de la etapa de recolección de biomasa y la figura 50b y figura 51 para el proceso de secado de biomasa, y en la figura 52 a y b para el proceso de extracción de aceite de microalgas y el proceso de esterificación y transesterificación.

A partir de la figura 49a se evidencia que el mayor contribuyente de emisiones contaminantes en esta categoría de impacto para la etapa de cultivo es el  $\text{NO}_x$  con un 67,93%, seguido por el  $\text{NH}_3$  con 31,16%, mientras que las emisiones de N, P y  $\text{NO}_3$  son menores al 1%. Estas emisiones contaminantes se deben principalmente al uso de urea, al uso de electricidad y al uso de triplesuperfosfato. Las emisiones de  $\text{NH}_3$  se deben principalmente al uso de urea con un 98,93% y el uso de electricidad y triplesuperfosfato presenta emisiones menores al 1%; igualmente las emisiones de  $\text{NO}_x$  son debidas al uso de urea en un 52,7%, al uso de triplesuperfosfato en un 9,78% y al uso de electricidad en un 37,07%. Las emisiones de  $\text{NO}_3$  y P también se deben al uso de urea, al uso de triplesuperfosfato y al uso de electricidad en un 35,3%, 4,08% y 60,67%; 72,7%, 19,52% y 8,25% y las emisiones de N se deben al uso de electricidad como puede se puede mostrar en la figura 49b.

En la figura 50a se muestra los procesos de recolección de biomasa y en la figura 50b el proceso de secado. Se evidencia que el mayor impacto potencial es debido al contaminante  $\text{NO}_x$  y  $\text{NH}_3$  para los métodos de FQM y FQH en esta

categoría de impacto. Estas emisiones son debidas principalmente a las cargas que vienen atribuidas a la corriente de slurry de biomasa que ingresa a la cosecha proveniente del cultivo en un 70,20%, al uso de sulfato de aluminio aproximadamente en un 25,84% y al uso de electricidad en una menor proporción aproximadamente en un 4%. El método de FMcH presenta en una menor proporción el contaminante  $\text{NO}_x$ , las emisiones de  $\text{NH}_3$  se atribuyen al uso de anilina en un 67,65% y a la corriente de slurry que ingresa en un 32,27%, por otro lado las emisiones de N se debe totalmente al uso de la anilina.

En el proceso de secado las emisiones contaminantes que presentan una mayor impacto como los casos anteriores es el  $\text{NO}_x$  seguido en una menor proporción por el  $\text{NH}_3$  y el N como se muestra en la figura 50b. La contribución del contaminante  $\text{NO}_x$  es causada por las cargas que trae la corriente de ingreso de biomasa húmeda, por el uso de gas natural y por el uso de electricidad. Las emisiones de  $\text{NH}_3$  es debida a las cargas que trae la corriente de ingreso de biomasa húmeda y la emisión de N es principalmente por el uso de gas como se muestra en la figura 51. El proceso de extracción de aceite que en mayor medida contribuye a las emisiones de  $\text{NO}_x$  en esta categoría de impacto es EEH, el resto de los procesos tienen una contribución menor como se muestra en la figura 52a.

Figura 48. Inventario de emisiones del proceso de cultivo de microalgas para la categoría de impacto de Eutrofización.

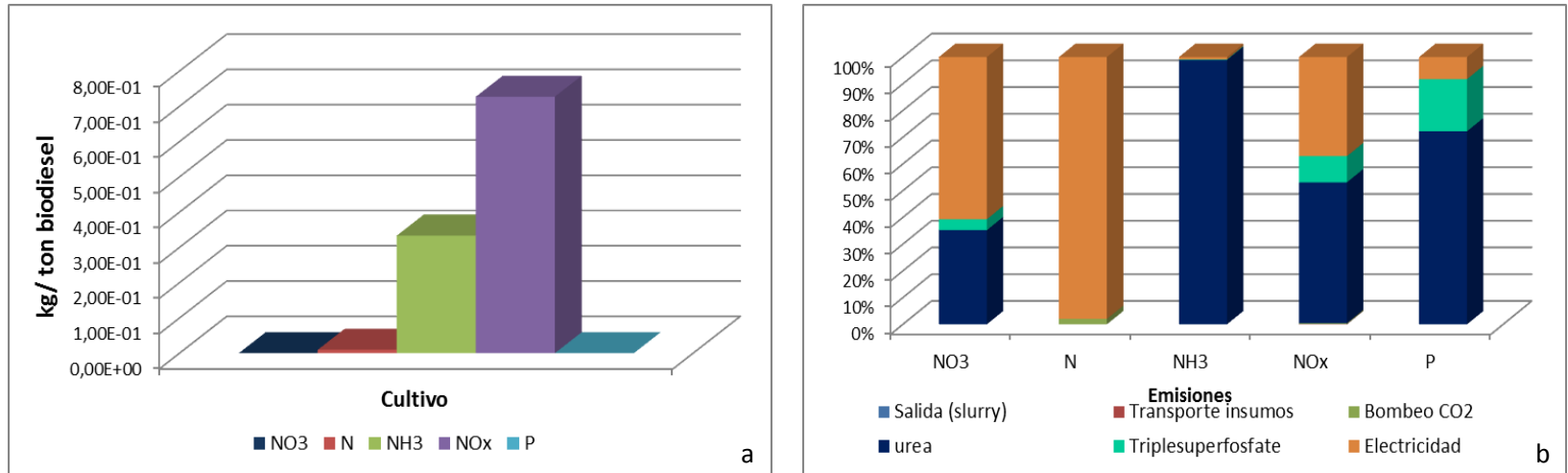
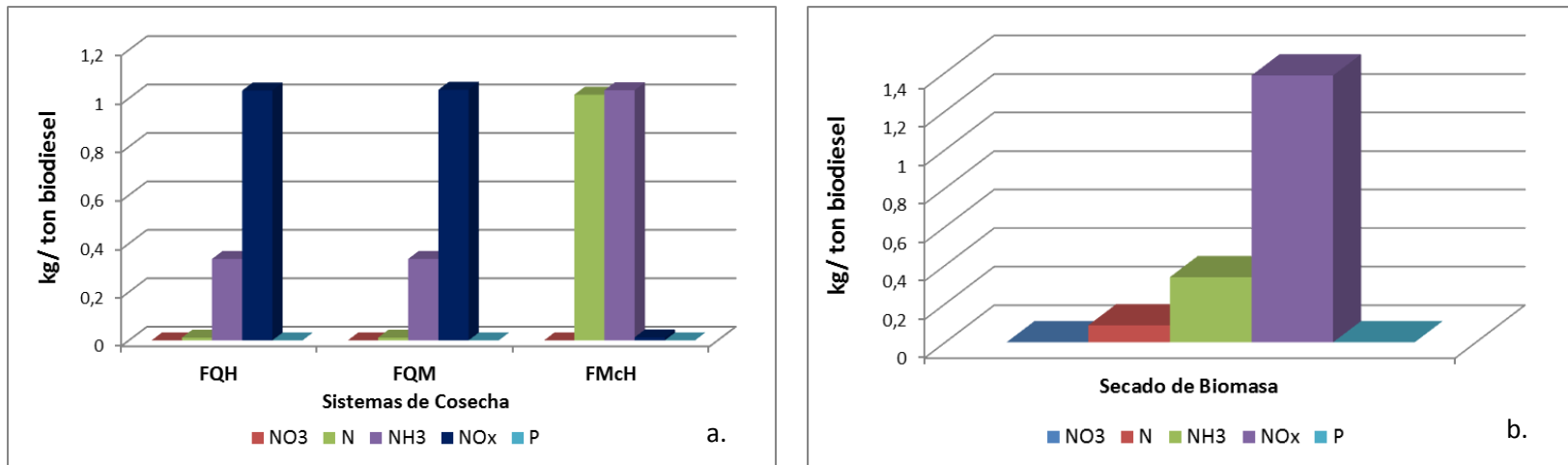
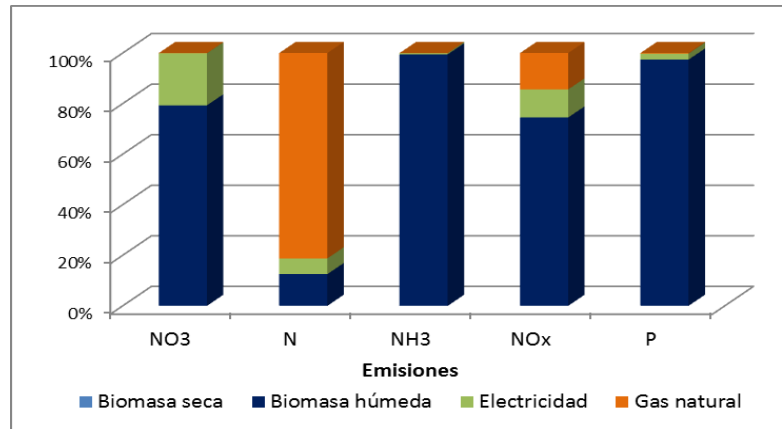


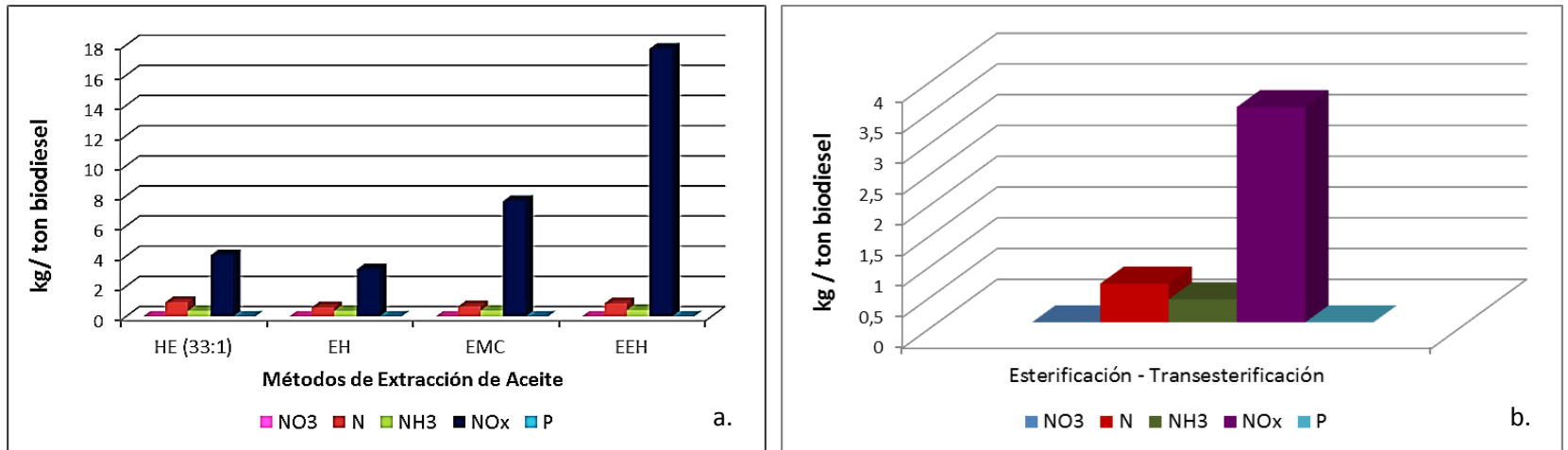
Figura 49. Inventario de emisiones de la categoría de impacto de Eutrofización para: a. procesos de recolección de biomasa. b. procesos de secado de biomasa de microalgas.



**Figura 50. Inventario de emisiones de la categoría de impacto de Eutrofización para el proceso de secado de biomasa de microalgas.**



**Figura 51. Inventario de emisiones de la categoría de impacto de Eutrofización para: a. el proceso de extracción de aceite de microalgas, b. proceso de esterificación y transesterificación de aceite de microalgas.**



Las emisiones de  $\text{NO}_x$  en el proceso de extracción EEH son causadas por el uso de etanol, el uso de gas natural y las cargas que traen la corriente de la biomasa seca que ingresa al sistema. Las mayores emisiones contaminantes generadas en el proceso de Esterificación – transesterificación en esta categoría de impacto son  $\text{NO}_x$ , seguido por el contaminante N, mientras que el  $\text{NH}_3$  tiene una menor contribución.

**3.1.5. Formación de Ozono Troposférico (FOT).** En cuanto a las emisiones para la categoría de FOT se presentan los resultados del inventario realizado para las emisiones contaminantes de  $\text{NO}_x$ , NMVOC (componentes orgánicos volátiles distintos del metano), formaldehído (HCHO), Dioxin y  $\text{SO}_2$ , sobre cada una de las etapas que involucran el proceso de producción de biodiesel.

La distribución de las diferentes contaminantes que contribuyen a la EUT en las distintas etapas del proceso pueden observarse: en la figura 53 a y b las emisiones generadas para la etapa de cultivo, en la figura 54a para cada uno de los métodos estudiados de la etapa de recolección de biomasa y la figura 54b y figura 55 para el proceso de secado de biomasa, y en la figura 56 a y b para el proceso de extracción de aceite de microalgas y el proceso de esterificación y transesterificación.

A partir de la figura 53a se evidencia que el mayor contribuyente de emisiones contaminantes en esta categoría de impacto para la etapa de cultivo es el  $\text{SO}_2$ , el  $\text{NO}_x$  y NMVOC en un 42,27%, 33,08% y 24,59% respectivamente, mientras que las emisiones de HCHO y Dioxin son bajas comparadas con las anteriores. Estas emisiones contaminantes se deben principalmente al uso de urea, al uso de electricidad y al uso de triplesuperfosfato. Como se muestra en la figura 53b las emisiones de  $\text{SO}_2$  se debe principalmente al uso de urea, triplesuperfosfato y electricidad en un 42,09%, 29,50% y 28,32% respectivamente; igualmente las

emisiones de  $\text{NO}_x$  y NMVOC son debidas al uso de urea, triplesuperfosfato y al uso de electricidad.

En la figura 54a se muestra la carga ambiental de los procesos de recolección de biomasa y en la figura 54b la carga ambiental del proceso de secado de biomasa. Se evidencia que el mayor impacto potencial es debido al contaminante NMVOC para el método de FMcH en esta categoría de impacto. Esta emisión es debida al uso anilina en un 72,29% y a las cargas que vienen atribuidas a la corriente de slurry de biomasa que ingresa a la cosecha proveniente del cultivo en un 25,77%. Notoriamente se observa que los procesos de FQM y FQH presentan cargas ambientales menores a la del método de FMcH.

En el proceso de secado las emisiones contaminantes que presentan una mayor impacto como la etapa del cultivo es el NMVOC,  $\text{SO}_2$  y el  $\text{NO}_x$  como se muestra en la figura 54b. La contribución del contaminante NMVOC es causada principalmente por el uso de gas natural, los contaminantes  $\text{SO}_2$  y el  $\text{NO}_x$  es causado por las cargas ambientales que trae la corriente de ingreso de biomasa húmeda seguido por el uso de gas natural y por el uso de electricidad. Las emisiones de HCHO y Dioxin son debidas principalmente a las cargas ambientales que trae la corriente de ingreso de biomasa húmeda como se muestra en la figura 55.

Figura 52. Inventario de emisiones del proceso de cultivo de microalgas para la categoría de impacto de FOT.

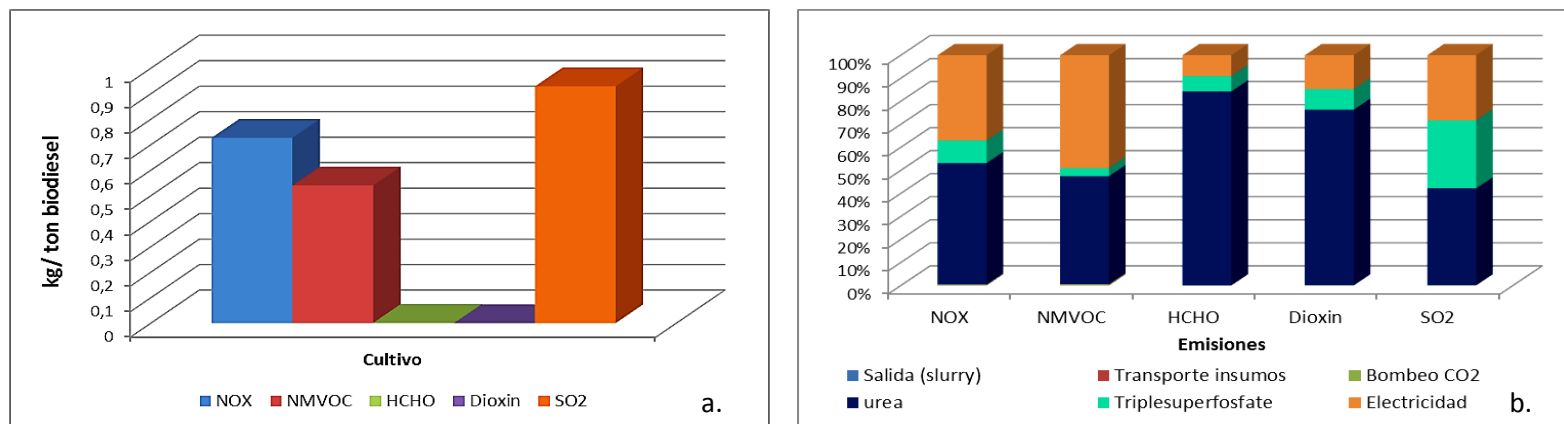


Figura 53. Inventario de emisiones de la categoría de impacto FOT para: a. procesos de recolección de biomasa. b. procesos de secado de biomasa de microalgas.

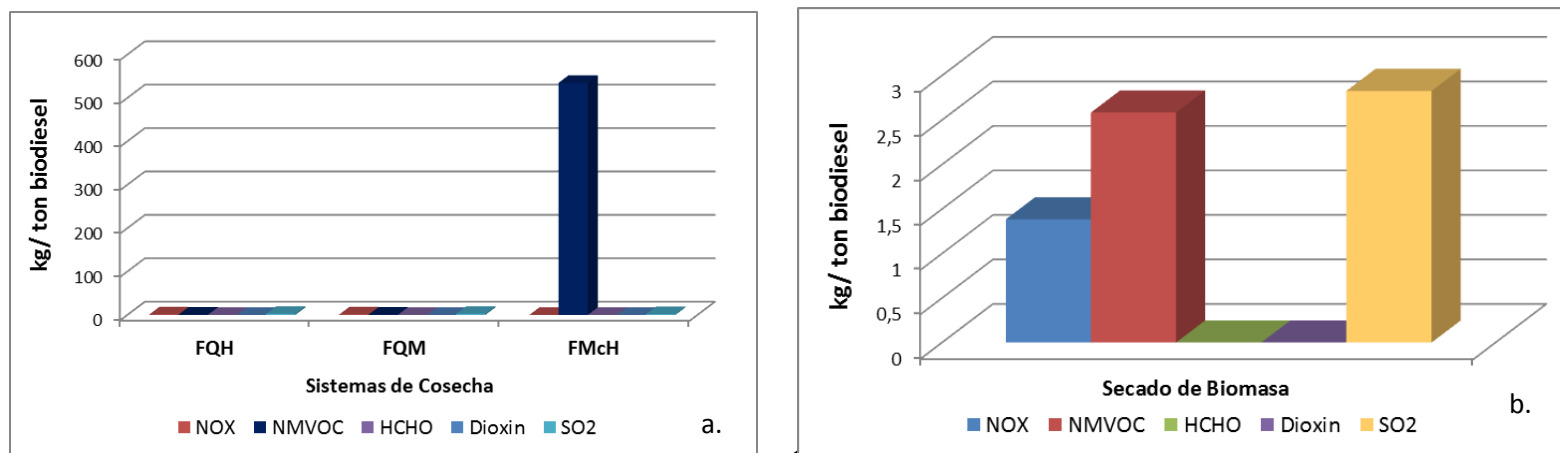


Figura 54. Inventario de emisiones de la categoría de impacto FOT para el proceso de secado de biomasa.

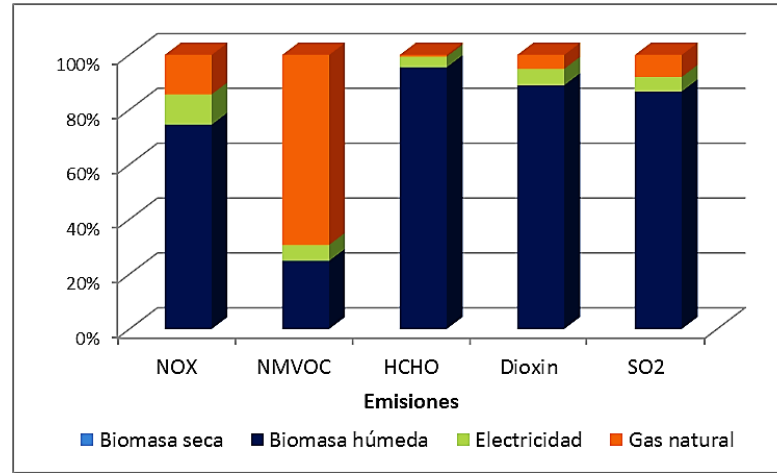
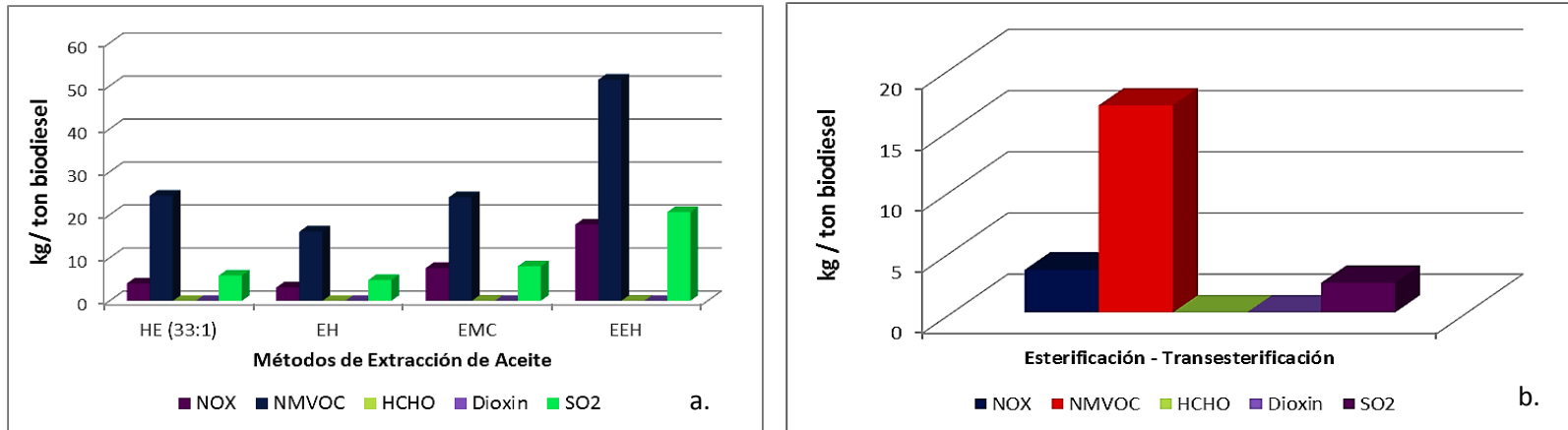


Figura 55. Inventario de emisiones de la categoría de impacto FOT para: a. proceso de extracción de aceite de microalgas, b. proceso de esterificación y transesterificación de aceite de microalgas.



El proceso de extracción de aceite que en mayor medida contribuye a las emisiones contaminantes de NMVOC, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> en esta categoría de impacto es EEH comparado con HE (33:1), EMC y EH que tienen emisiones más bajas como se muestra en la figura 56a. Las emisiones de NMVOC en el proceso de extracción EEH son causadas por el uso de etanol, el uso de gas natural y las cargas que traen la corriente de la biomasa seca que ingresa al sistema de extracción de aceite. Las mayores emisiones contaminantes generadas en el proceso de esterificación – transesterificación en esta categoría de impacto son NMVOC en mayor proporción, seguido por NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, estas emisiones son debidas a las cargas ambientales que trae la corriente de ingreso de aceite de microalgas.

3.1.6. Agotamiento de la capa de ozono estratosférico (ACO). En cuanto a las emisiones para la categoría de ACO se presentan los resultados del inventario realizado para las emisiones contaminantes que usan los clorofluorocarbonos (CFC) y las sustancias reactivas que contienen cloro, a continuación se lista las sustancias contaminantes que fueron incluidas en esta categoría de impacto:

1,1,1 – Trichloroetano – HCFC-140

1,1,2 – Trichloroetano - 1,2,2 – Trifluoroetano - CFC-113

1,2 – Dichloroetano - 1,1,2,2 - Tetrafluoroetano - CFC-114

Bromometano - Halon 1001

Bromochlorodifluorometano - Halon 1211

Bromotrifluorometano - Halon 1301

Chlorodifluorometano - HCFC-22

Dichlorodifluorometano - CFC-12

Monochlorometano - R-40

Tetrachlorometano - CFC-10

Trichlorofluorometano - CFC-11

La distribución de los diferentes contaminantes que contribuyen a la ACO en las distintas etapas del proceso pueden observarse: en la figura 57 a y b las emisiones generadas para la etapa de cultivo, en la figura 58a para cada uno de los métodos estudiados de la etapa de recolección de biomasa y la figura 58b para el proceso de secado de biomasa, y en la figura 59 a y b para el proceso de extracción de aceite de microalgas y el proceso de esterificación y transesterificación.

A partir de la figura 57a se evidencia que el mayor contribuyente de emisiones contaminantes en esta categoría de impacto para la etapa de cultivo es el Chlorodifluorometano - HCFC-22 seguido por el Bromochlorodifluorometano - Halon 1211 en un 72,38% y 20,45% respectivamente, mientras que los demás contaminantes se encuentran en una menor proporción comparado con los anteriores. Estas emisiones contaminantes se deben principalmente al uso de urea y en menor proporción al uso de triplesuperfosfato como se puede observar en la figura 57b, notando también que el uso de urea tiene igualmente la mayor incidencia en las otras emisiones contaminantes excepto en la emisión de Trichlorofluorometano – CFC–11 donde su impacto ambiental es generado por el uso de electricidad.

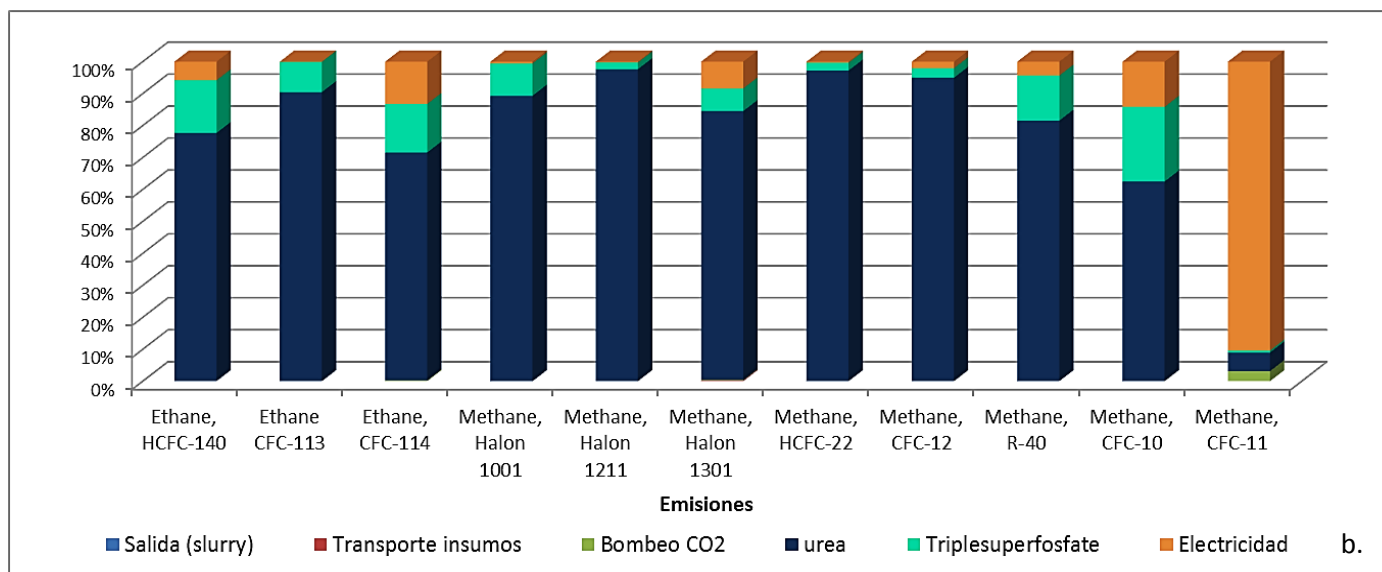
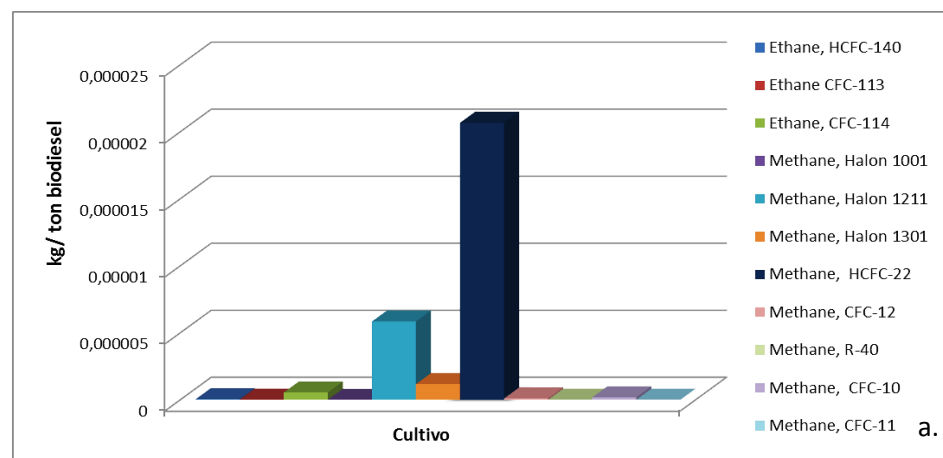
En la figura 58a se muestra la carga ambiental de los procesos de recolección de biomasa, donde se evidencia que el mayor impacto potencial es debido al contaminante Chlorodifluorometano - HCFC-22 seguido por los contaminantes Bromochlorodifluorometano - Halon 1211, Bromotrifluorometano - Halon 1301 y 1,2 – Dichloroetano - 1,1,2,2 - Tetrafluoroetano - CFC-114 para los tres métodos de recolección de biomasa. Estas emisiones para el método de FMcH es debida al uso anilina y a las cargas que vienen atribuidas a la corriente de slurry de biomasa que ingresa al proceso de cosecha proveniente del cultivo. Notoriamente se observa que los procesos de FQM y FQH presentan cargas ambientales menores a la del método de FMcH y estas son atribuidas principalmente a las cargas que

vienen de la corriente de slurry de biomasa que ingresa al proceso de cosecha seguido por el uso de sulfato de aluminio.

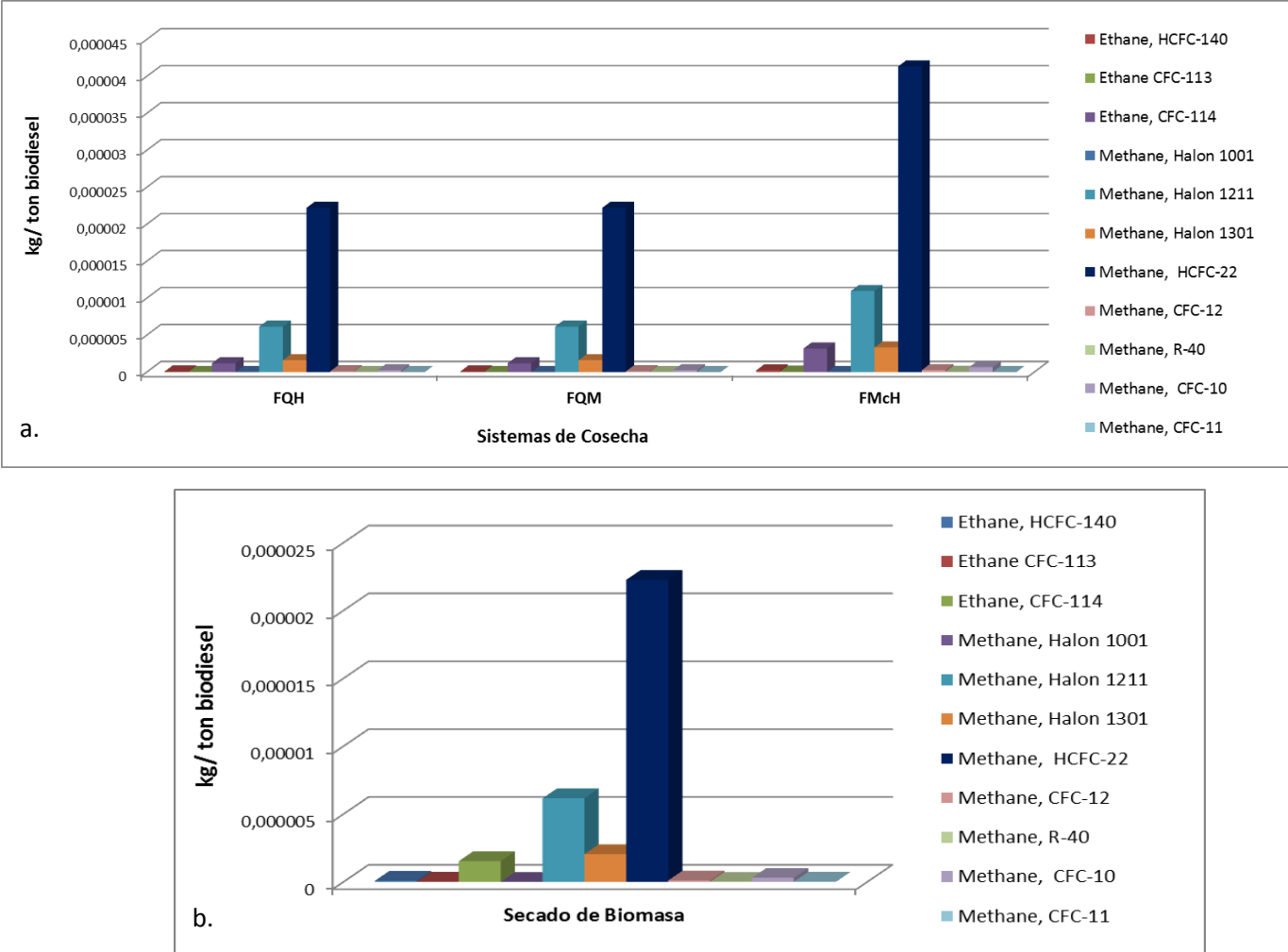
En el proceso de secado de biomasa las emisiones contaminantes que presentan una mayor impacto son las mismas que se fueron vistas anteriormente en el proceso de recolección de biomasa y esto se puede observar en la figura 58b. La contribución de los contaminantes Chlorodifluorometano - HCFC-22 y Bromochlorodifluorometano - Halon 1211 es debida a las cargas ambientales que trae la corriente de ingreso de biomasa húmeda y de los contaminantes Bromotrifluorometano - Halon 1301 y 1,2 - Dichloroetano - 1,1,2,2 - Tetrafluoroetano - CFC-114 es debida igualmente a las cargas ambientales que trae la corriente de ingreso de biomasa húmeda y por el uso de gas natural principalmente,

El proceso de extracción de aceite que en mayor medida contribuye a las emisiones contaminantes de Tetrachlorometano - CFC-10, Chlorodifluorometano - HCFC-22 y Bromochlorodifluorometano - Halon 1211 en esta categoría de impacto es EMC comparado con HE (33:1), EH y EEH que tienen emisiones más bajas como se muestra en la figura 59a. Las emisiones de Tetrachlorometano - CFC-10 en el proceso EMC son ocasionadas por el uso de cloroformo y las emisiones de Chlorodifluorometano - HCFC-22 y Bromochlorodifluorometano - Halon 1211 son causadas por el uso de metanol. Las mayores emisiones contaminantes generadas en el proceso de esterificación – transesterificación en esta categoría de impacto se muestra (ver figura 59b) son Chlorodifluorometano - HCFC-22 seguido por los contaminantes Bromochlorodifluorometano - Halon 1211, Bromotrifluorometano - Halon 1301 y 1,2 - Dichloroetano - 1,1,2,2 - Tetrafluoroetano - CFC-114, estas emisiones son causadas principalmente por las cargas que trae la corriente de aceite de microalgas que ingresa al sistema seguido por el uso de metanol y la electricidad.

Figura 56. Inventario de emisiones del proceso de cultivo de microalgas para la categoría de impacto de ACO



**Figura 57. Inventario de emisiones de la categoría de impacto de ACO para: a. procesos de recolección de biomasa. b. procesos de secado de biomasa de microalgas.**





### **3.2. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE IMPACTOS POTENCIALES DEL CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL DE MICROALGAS**

La fase de evaluación de impacto tiene como objetivo evaluar la magnitud de los impactos ambientales potenciales, a partir de las cargas identificadas en el inventario de los procesos implicados a lo largo de todo el ciclo, para los diferentes escenarios en estudio.

Los resultados que se presentan en este estudio están relacionados con dos aspectos fundamentales dentro de las categorías de impacto en los ACV como fue visto anteriormente:

- Categoría de impacto de calentamiento global, es decir, la cuantificación de las emisiones de GEI en el ciclo de vida de los escenarios estudiados, resaltando los ahorros producidos en el ciclo de vida completo del biodiesel y la comparación con los valores definidos en la directiva Europea sobre energías renovables (83,8g CO<sub>2</sub> eq/MJ y PCI diésel 43 MJ/kg ).
- Categoría de impacto de consumo de energía fósil, es decir, la realización de los balances energéticos o uso de energía en la producción de los sistemas estudiados.

Finalmente, se presentan los resultados para otras categorías de impacto según el método EPD (2007) como son acidificación, eutrofización, precursores de ozono troposférico y agotamiento de la capa de ozono vistos en el análisis de inventario de emisiones del apartado anterior. Para ello se han tenido en cuenta las consideraciones realizadas para el caso de la producción hipotética de 100% biodiesel, donde se analizarán los escenarios de la fase 1, seleccionando el mejor perfil ambiental para luego ser comparado con los escenarios de la fase 2, como se expuso en el apartado de definición de escenarios a evaluar. Todos los

resultados se muestran referidos a la unidad funcional, como se ha definido en la sección 2.6.1.2.

### **3.2.1. Evaluación de impactos potenciales del Ciclo de Vida de los escenarios de la fase 1**

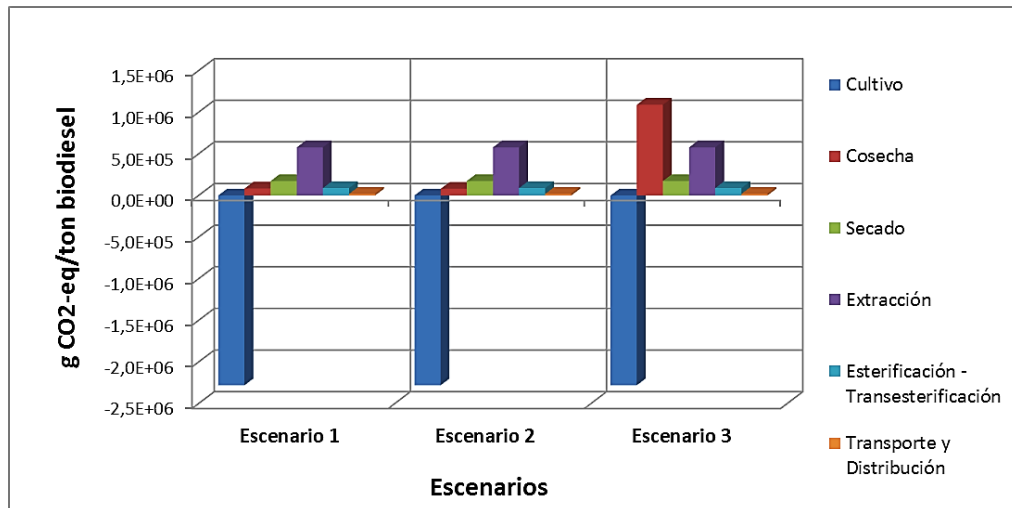
**3.2.1.1. Potencial de Calentamiento Global (PCG):** En la figura 60 se muestran las emisiones de gases de efecto invernadero de los escenarios 1, 2 y 3 que tienen lugar en el ciclo de vida de la producción de biodiesel de microalgas, incluido el transporte y distribución del biodiesel al depósito de almacenamiento. En el anexo E, F y G se muestra de la red de Ciclo de Vida de los tres escenarios tomados de SimaPro.

Como se puede observar, el escenario 3, es el que más emisiones de gases de efecto invernadero asociadas tiene debidos a la etapa de cosecha seguidos por las etapas de extracción de aceite y secado, mientras que los escenarios 1 y 2 presentan menores emisiones de este tipo comparado con el escenario 3, donde las etapas de extracción de aceite y secado poseen las mayores emisiones de este tipo. Todos los escenarios presentan reducción considerable de gases de efecto invernadero en la etapa de cultivo

La Directiva Europea relativa al uso de biocombustibles (2009/28/EC) [137], establece un marco común para la promoción de energía de fuentes renovables. En este sentido, dicha directiva estableció criterios de sostenibilidad para biocarburantes y biolíquidos que se usen en Europa, destacando que la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) de los biocarburantes debería reducir al menos el 35% de las emisiones por combustibles fósiles (83,8 gCO<sub>2</sub>-eq/MJ). Con el fin de evaluar el cumplimiento teórico respecto a los criterios de sostenibilidad propuestos en la Directiva Europea 2009/28/CE, se ha calculado las emisiones de gases de efecto invernadero asociado a los tres escenarios de producción,

transporte y distribución de biodiesel de microalgas dentro del marco de Análisis de Ciclo de Vida sin tener en cuenta la combustión del biodiesel.

**Figura 59. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Contribución por etapas.**



La reducción de emisiones de gases de efecto invernadero procedentes de los biocarburantes y biolíquidos se calculó como sigue [137]:

$$REDUCCIÓN = \frac{(EF - EB)}{EF} \quad (12)$$

Siendo,

EB = las emisiones totales procedentes del biocarburante o biolíquido, y

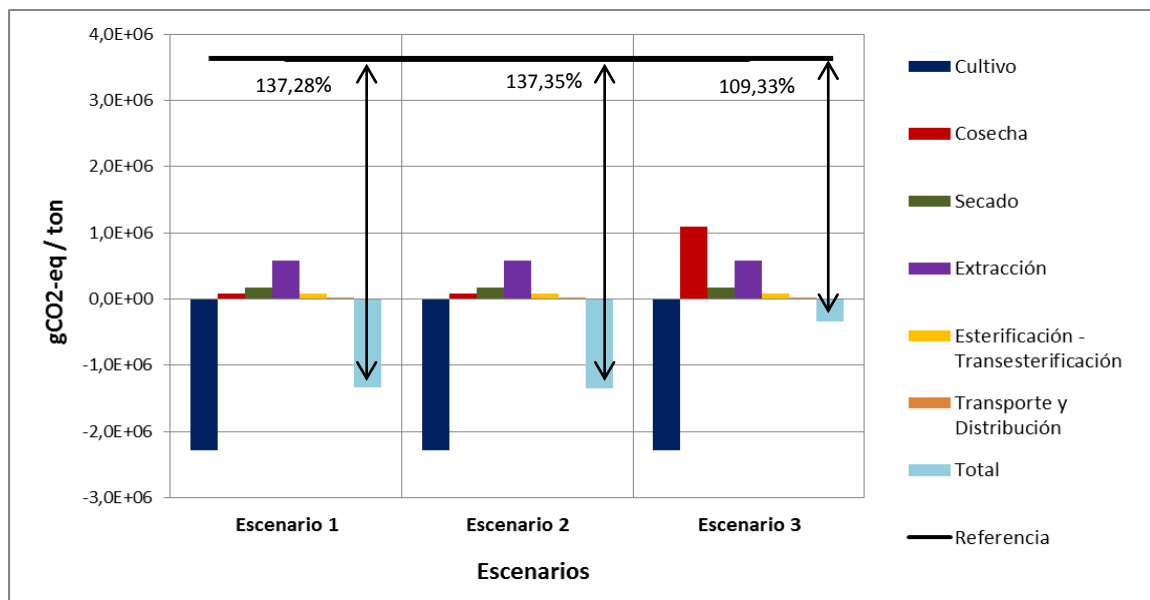
EF = las emisiones totales procedentes del combustible fósil de referencia.

Luego esta reducción es multiplicada por 100 para hallar el porcentaje de reducción de gases de efecto invernadero.

Los resultados mostrados en la figura 61 indican una reducción significativa de los gases de efecto invernadero para los escenarios 1 y 2, estos dos presentan reducciones de 137,28% para el escenario 1 y 137,35% para el escenario 2, lo que puede explicarse debido a la gran captura de CO<sub>2</sub> durante la etapa de cultivo

para la producción de biomasa. Esta reducción decrece a un 109,33% en el escenario 3.

**Figura 60. Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (g CO<sub>2</sub>-eq/ ton biodiesel) y ahorro de emisiones para los escenarios de la fase 1.**



A partir de los resultados anteriores se observó que los escenarios que presenta un mejor comportamiento ambiental son el escenario 1 y el escenario 2, mostrándose que entre las etapas del cultivo hasta el transporte y distribución presenta una reducción significativa de gases de efecto invernadero comparado con el escenario 3.

**Emisiones de gases de efecto invernadero de la producción, transporte-distribución y uso de los escenarios estudiados en la fase 1.**

Para calcular los ahorros de emisiones de gases de efecto invernadero habría que considerar el ciclo completo de vida de la cuna a la tumba (Cradle-to-grave, C2G por su siglas en ingles), es decir, las emisiones desde el inicio del proceso en el cultivo de la microalga, hasta las emisiones generadas por la combustión del biodiesel en el motor del vehículo.

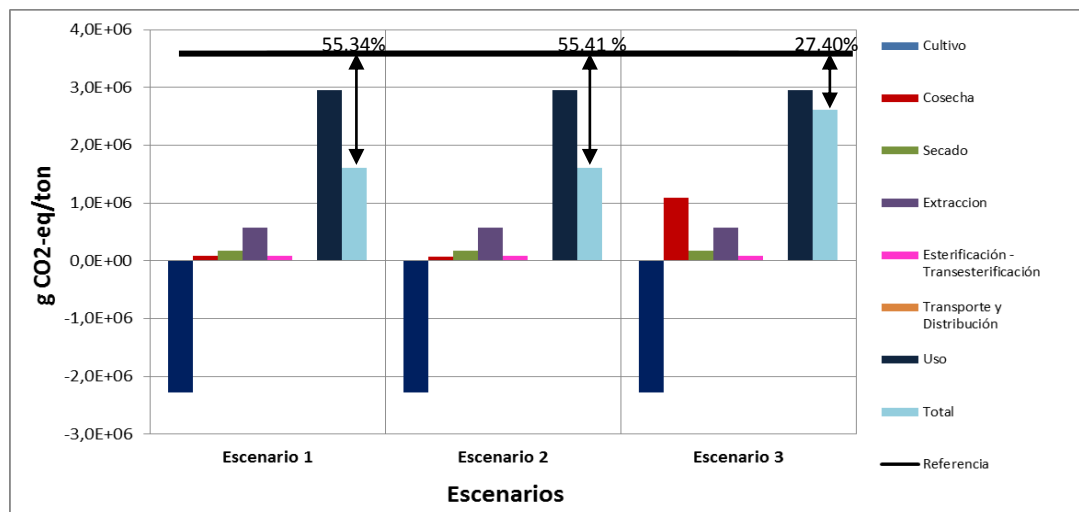
En este sentido, se han calculado las emisiones de gases de efecto invernadero originadas por el uso de biodiesel puro estudiado en un vehículo. Los resultados se muestran en la tabla 29 expresados en g/ton biodiesel.

**Tabla 29. Emisiones de gases de efecto invernadero del tubo de escape del vehículo de referencia en el biodiesel estudiado (g/ton biodiesel).**

g/ton	N <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Total de GEI
Biodiesel en estudio	265,84	2867438,08	235,63	2867939,55

La reducción total teniendo en cuenta todo el ciclo completo se realizó para cada uno de los escenarios estudiados en la fase 1 y estos son mostrados en la figura 62. Teniendo en cuenta las emisiones de todos los gases de efecto invernadero se obtiene que, la producción de biodiesel y uso de biodiesel puro en los escenarios 1 y 2 evita la emisión de 1994266 g de CO<sub>2</sub> equivalentes por cada tonelada y 1996807 g de CO<sub>2</sub> equivalentes por cada tonelada respectivamente, lo que manifiesta un porcentaje de ahorro de 55,34% y 55,41%, esta reducción decrece para el escenario 3 con un 27,40% de reducción neta con el valor de referencia.

**Figura 61. Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (g CO<sub>2</sub>-eq/ ton biodiesel) y ahorro de emisiones para los escenarios estudiados en la fase 1 teniendo en cuenta el ciclo completo.**



En el ciclo de vida del biodiesel de microalgas, las mayores emisiones de gases efecto invernadero se producen en la etapa de uso, seguido por la etapa de cosecha, la etapa de extracción y secado para el escenario 3; para los escenarios 1 y 2 las mayores emisiones son igualmente debidas al uso del biodiesel, seguido en una menor proporción por la etapa de extracción de aceite y secado de biomasa, evidenciándose una reducción en la etapa de cultivo para los tres escenarios, lo que puede explicarse debido a la gran captura de CO<sub>2</sub> de la microalga.

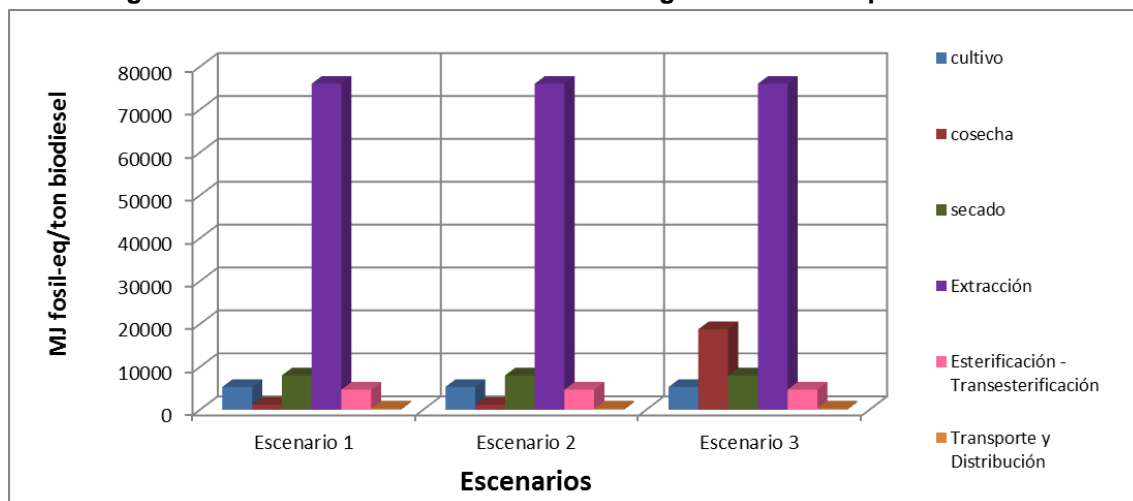
La siguiente tabla muestra los valores de la emisiones de GEI en el ciclo de vida completo de cada escenario de la fase 1 y el porcentaje de reducción o ahorro de emisiones en función del estándar de la Directiva 2009/28/EC (83,8 g CO<sub>2</sub> eq/MJ diésel).

**Tabla 30. Emisiones de GEI (C2G) de los tres escenarios y porcentaje de ahorro de emisiones.**

Escenarios	Cultivo	Cosecha	Secado	Extracción	E - T	Transporte y Distribución	Uso	Total	% de ahorro
Escenario 1	-2281620	81750	172881	577485	87919	18171	2952549	1609134	55,34
Escenario 2	-2281620	79162	172881	577485	87965	18171	2952549	1606593	55,41
Escenario 3	-2281620	1088771	172881	577485	87966	18171	2952549	2616204	27,40
<b>E-T: Esterificación – Transesterificación</b>									

**3.2.1.2. Categoría de consumo de energía fósil:** A continuación en la figura 63, se presenta el consumo de energía fósil para cada una de las etapas de ciclo de vida para los escenarios estudiados en la fase 1.

**Figura 62. Contribución al consumo de energía fósil en MJeq/ton biodiesel**



Como era de esperar a partir de los resultados del inventario en la sección anterior, la etapa que da lugar a la mayor contribución en el consumo de energía fósil es la extracción de aceite para los tres escenarios en estudio en 75996 MJeq/ton, seguido por la etapa de secado en 7994 MJeq/ton. Para el escenario 3 la etapa de cosecha tiene una contribución mayor (18762 MJeq/ton) respecto a los otros escenarios en un 16,6%, esto se observa en la tabla 31.

**Tabla 31. Contribución del ciclo de vida de los escenarios de la fase 1 al consumo de energía fósil (MJeq/ton biodiesel).**

Escenarios	Cultivo	Cosecha	Secado	Extracción	Esterificación - Transesterificación	Transporte y Distribución	Total
Escenario 1	5314	1178	7994	75996	4684	313	95480
Escenario 2	5314	1157	7994	75996	4685	313	95460
Escenario 3	5314	18762	7994	75996	4685	313	113065

A partir de los datos de energía fósil consumida y la energía contenida en el biodiesel, se calculó el Ratio de Energía Fósil (REF), que como ya es definida, relaciona la cantidad de energía contenida en el combustible (PCI), con la energía fósil consumida para producirlo y distribuirlo.

El ratio de energía fósil y el consumo de energía fósil de la producción de biodiesel de los tres escenarios analizados en este estudio de ACV se muestran en la tabla 32. Para el análisis, se tomó como se mencionó anteriormente un PCI para el biodiesel de 37,8 MJ/kg.

**Tabla 32. Contribución de los escenarios de la fase 1 al consumo de energía fósil (MJ-eq/ton biodiesel) y el ratio de energía fósil.**

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Unidades
Energía Fósil	95480	95460	113065	MJeq/ton biodiesel
Ratio de Energía Fósil (REF)	0,40	0,40	0,33	MJ biodiesel/MJ fósil

El escenario 1 y 2 presenta un REF de 0,40 MJ de energía producida/MJ de energía de fósil y el escenario 3 con 0,33 MJ de energía producida/MJ de energía de fósil. De lo anterior se puede constatar que el escenario 2, tiene un ratio de energía sustancialmente mejor que los otros dos casos, esto se debe a que presenta un menor consumo de energía fósil en el sistema de cosecha de biomasa comparado con los otros dos escenarios analizados.

A continuación, se presentan los resultados de las emisiones de impactos ambientales potenciales de los escenarios evaluados en la fase 1 para las otras cuatro categorías de impacto según el método EPD (2007).

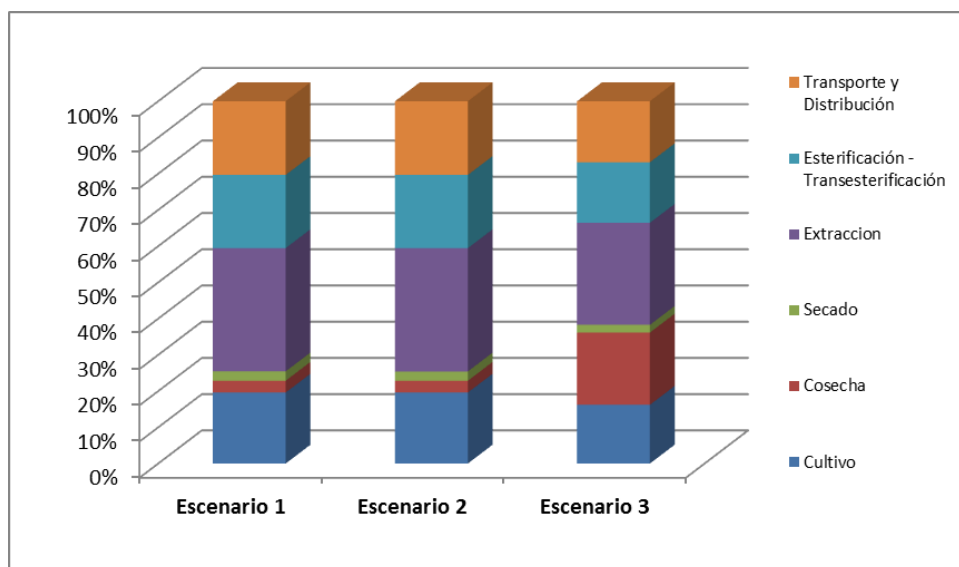
**3.2.1.3. Agotamiento Capa de Ozono Estratosférico (ACO):** Se ha calculado el potencial de destrucción de ozono estratosférico originado en los escenarios analizados. Los resultados se muestran en la tabla 33 y en la figura 64 el porcentaje de contribución de esta categoría de impacto.

**Tabla 33. Agotamiento de la capa de ozono (kg FC11eq/ton de biodiesel).**

Escenarios	Cultivo	Cosecha	Secado	Extracción	Esterificación - Transesterificación	Transporte y Distribución	Total
Escenario 1	0,000025	0,000004	0,000003	0,000043	0,000026	0,000026	0,000127
Escenario 2	0,000025	0,000004	0,000003	0,000043	0,000026	0,000026	0,000127
Escenario 3	0,000025	0,000031	0,000003	0,000043	0,000026	0,000026	0,000154

Las etapas que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto para los escenarios 1 y 2 son la extracción de aceite en primer lugar con un 34%, seguido del proceso de Esterificación - Transesterificación, del transporte y distribución y por la etapa de cultivo en un 20%. Las otras etapas tienen un porcentaje de contribución menor.

**Figura 63. Porcentaje de contribución por etapas en el Agotamiento de la Capa de Ozono.**



Para el escenario 3 la etapa que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto es la extracción en primer lugar con un 28%, seguido del proceso de cosecha con un 20%, del proceso de Esterificación - Transesterificación, del transporte y distribución en un 17% y por último la etapa de cultivo con un 16%. Las otras etapas tienen un porcentaje de contribución menor.

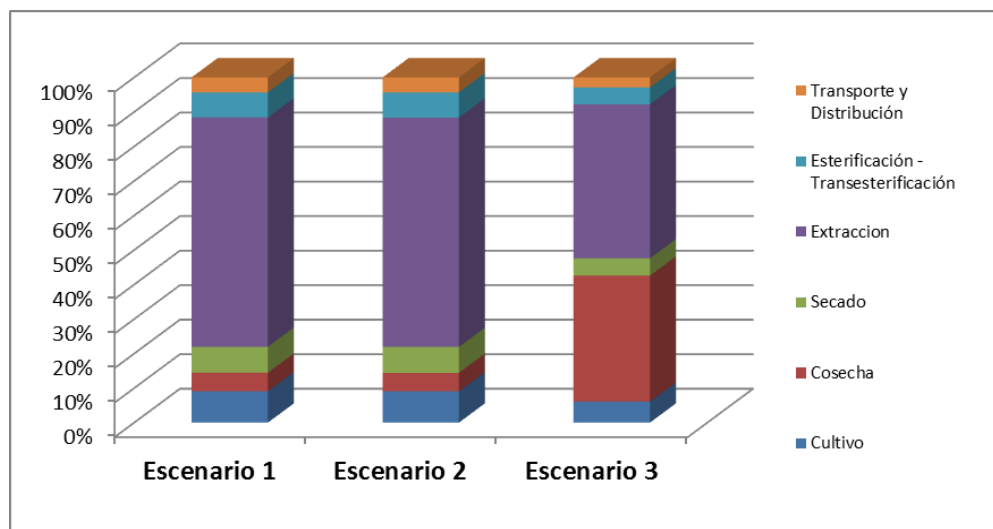
**3.2.1.4. Formación de ozono troposférico (FOT):** Se ha analizado la formación del ozono troposférico calculado en kilogramos de etileno para las distintas etapas del proceso en los escenarios estudiados de la fase 1. Los resultados se muestran en la tabla 34 y en la figura 65, donde se muestra el porcentaje de contribución de esta categoría de impacto.

**Tabla 34. Formación del Ozono Troposférico (kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/ton de biodiesel).**

	Cultivo	Cosecha	Secado	Extracción	Esterificación - Transesterificaci ón	Transporte y Distribución	Total
<b>Escenario 1</b>	0,090	0,054	0,075	0,660	0,073	0,043	0,995
<b>Escenario 2</b>	0,090	0,053	0,075	0,660	0,073	0,043	0,994
<b>Escenario 3</b>	0,090	0,540	0,075	0,660	0,073	0,043	1,481

Las etapas que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto para los escenarios 1 y 2 son la extracción de aceite en primer lugar con un 66%, seguido del proceso de secado en un 8 % y por la etapa de cultivo en un 9%. Las otras etapas tienen un porcentaje de contribución menor.

**Figura 64. Porcentaje de contribución por etapas en la Formación de ozono troposférico.**



Para el escenario 3 la etapa que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto es la extracción en primer lugar con un 45%, seguido del proceso de cosecha con un 36%, del proceso de secado en un 5% y por último la etapa de cultivo con un 6%. Las otras etapas tienen un porcentaje de contribución menor.

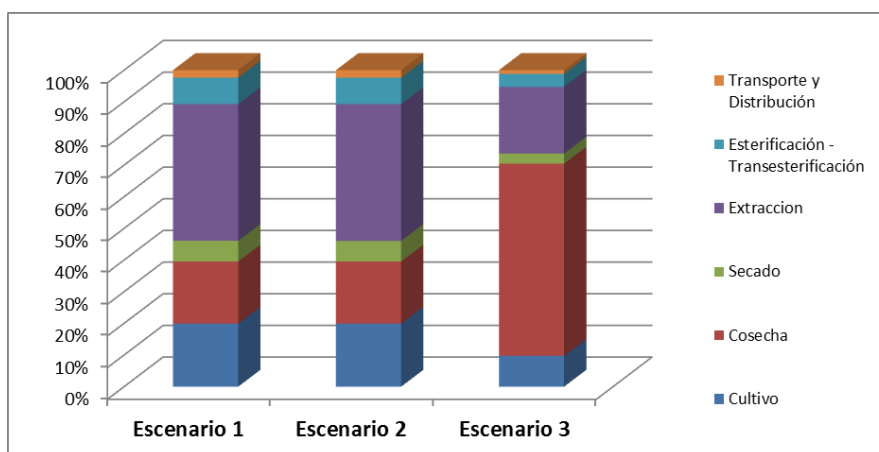
**3.2.1.5. Acidificación (ACD):** Se ha calculado la acidificación generada en los procesos de producción de biodiesel. El cálculo se ha determinado en kg SO<sub>2</sub>eq emitidos por kg de biodiesel producido. La tabla 35 y la figura 66 presentan la contribución de las diferentes etapas en el ciclo de vida.

**Tabla 35. Formación del Ozono Troposférico (kg SO<sub>2</sub>eq /ton biodiesel).**

	Cultivo	Cosecha	Secado	Extracción	Esterificación - Transesterificación	Transporte y Distribución	Total
<b>Escenario 1</b>	1,109	1,096	0,366	2,406	0,467	0,134	5,577
<b>Escenario 2</b>	1,109	1,093	0,366	2,406	0,467	0,134	5,574
<b>Escenario 3</b>	1,109	6,921	0,366	2,406	0,467	0,134	11,402

Las etapas que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto para los escenarios 1 y 2 son la extracción de aceite en primer lugar con un 43%, seguido por la etapa de cultivo y cosecha con un 20% y por proceso el proceso de esterificación-transesterificación en un 8% y. Las otras dos etapas tienen un porcentaje de contribución menor.

**Figura 65. Porcentaje de contribución por etapas en la Acidificación.**



Para el escenario 3 la etapa que en mayor medida contribuye a esta categoría de impacto es la cosecha de biomasa en primer lugar con un 61%, seguido del proceso de extracción con un 21% y por último la etapa de cultivo con un 10% de contribución. Las otras etapas tienen un porcentaje de contribución menor.

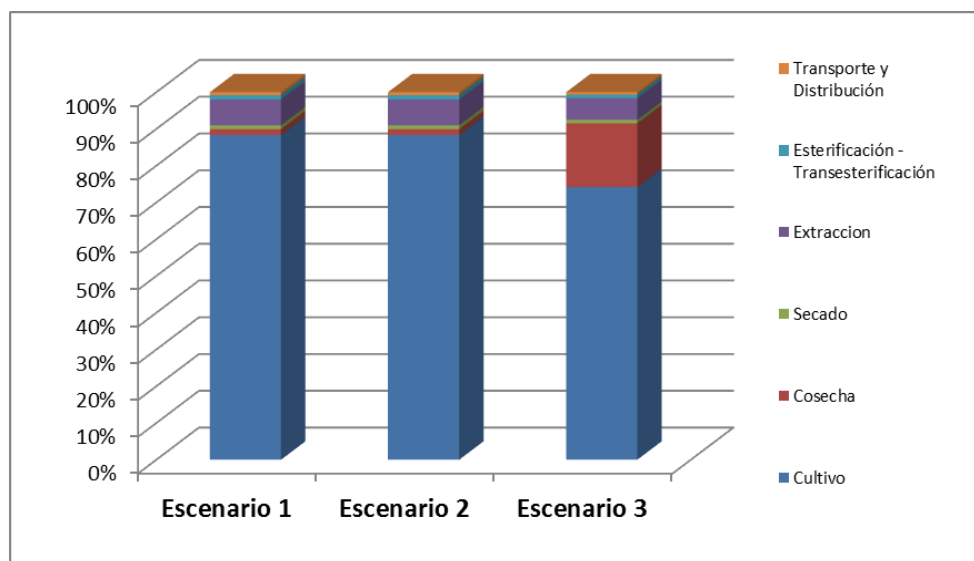
**3.2.1.6. Eutrofización (EUT):** Se ha calculado la Eutrofización generada en los escenarios en estudio. La tabla 36 y la figura 67 presentan la contribución de las diferentes etapas en el ciclo de vida de la producción de biodiésel, expresados en kg de PO<sub>4</sub>eq/kg de biodiésel.

**Tabla 36. Formación del Ozono Troposférico (kg PO<sub>4</sub>eq/ton biodiésel).**

	Cultivo	Cosecha	Secado	Extracción	Esterificación - Transesterificación	Transporte y Distribución	Total
<b>Escenario 1</b>	2,294	0,042	0,028	0,182	0,031	0,020	2,598
<b>Escenario 2</b>	2,294	0,042	0,028	0,182	0,031	0,020	2,597
<b>Escenario 3</b>	2,294	0,538	0,028	0,182	0,031	0,020	3,093

Las etapas que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto para los escenarios 1 y 2 es la etapa de cultivo en primer lugar con un 88,3%, seguido del proceso extracción en un 7%. Las otras etapas tienen un porcentaje de contribución menor.

**Figura 66. Porcentaje de contribución por etapas a la Eutrofización.**



Para el escenario 3 la etapa que en mayor medida contribuye a esta categoría de impacto es el cultivo en primer lugar con un 74%, seguido del proceso de cosecha de biomasa con un 17% y del proceso de extracción de aceite en un 6% de contribución. Las otras etapas tienen un porcentaje de contribución menor.

A partir de los resultados de evaluación de impactos ambientales potenciales expuestos anteriormente para los escenarios evaluados en la fase 1, se puede evidenciar que los escenarios 1 y 2 presentan resultados similares y en comparación con los criterios de sostenibilidad europeos mostraron una reducción hipotética de GEI y un menor consumo de energía fósil comparada con el escenario 3. Los resultados de los escenarios 1 y 2 aun siendo próximos, se observó que el escenario 2 presenta el mejor perfil ambiental ya que por diferencias muy pequeñas tiene una mayor reducción de GEI y un menor consumo de energía fósil.

En los escenarios evaluados en la fase 1, se comparó los tres procesos de recolección de biomasa o cosecha de biomasa (FQM, FQH, FMcH) donde en las otras etapas del proceso de producción de biodiesel (cultivo, secado, extracción y

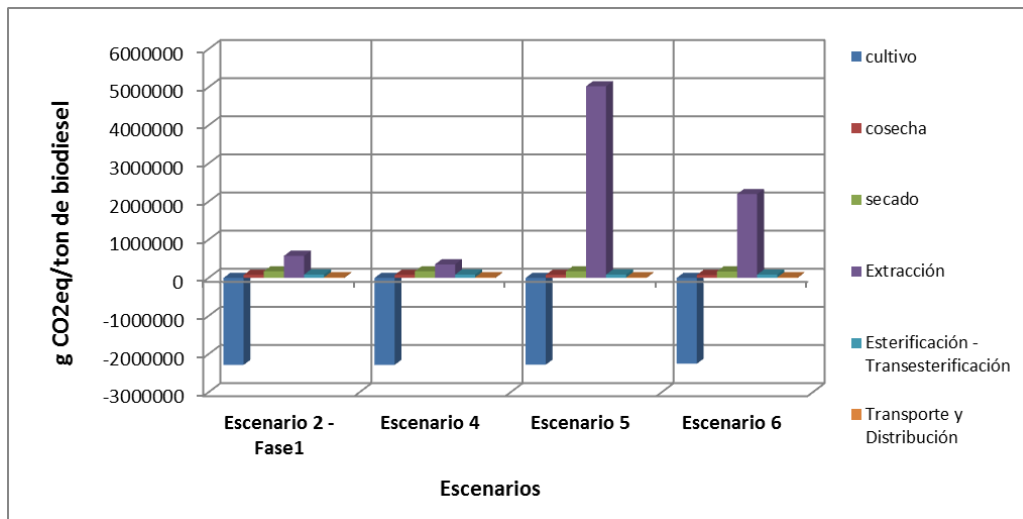
esterificación- transesterificación) se tomó los mismos para cada escenario; con esto y los resultados anteriores, el escenario 2 que comprende como método de cosecha la FQH es el seleccionado como escenario base para realizar la comparación de los escenarios en la fase 2 como se expuso en el apartado 2.4.

**3.2.2. Evaluación de impactos potenciales del Ciclo de Vida de los escenarios de la fase 2.** En esta sección se compararán los ciclos de vida de la producción de biodiesel (variando la etapa de extracción de aceite) del escenario base seleccionado en la fase 1 con los escenarios 4, 5 y 6 de la fase 2 definidos en el apartado 2.4. En el anexo H, I y J se muestran la red de Ciclo de Vida de los escenarios estudiados tomados directamente de SimaPro para la categoría de PCG.

**3.2.2.1. Potencial de Calentamiento Global (PCG):** En la figura 68 se muestran las emisiones de gases de efecto invernadero del escenario 2 que fue seleccionado en la fase 1, escenario 4, 5 y 6 que tienen lugar en el ciclo de vida de la producción de biodiesel de microalgas, incluido el transporte y distribución del biodiesel al depósito de almacenamiento.

Como se puede observar, el escenario 5, es el que más emisiones de gases de efecto invernadero asociadas tiene debidos a la etapa de extracción de aceite seguido por las etapa de secado, mientras que los escenarios 2 y 4 presentan menores emisiones de este tipo comparado con el escenario 5 y 6, donde las etapas de extracción de aceite y secado poseen las mayores emisiones de este tipo. Todos los escenarios presentan reducción considerable de gases de efecto invernadero en la etapa de cultivo.

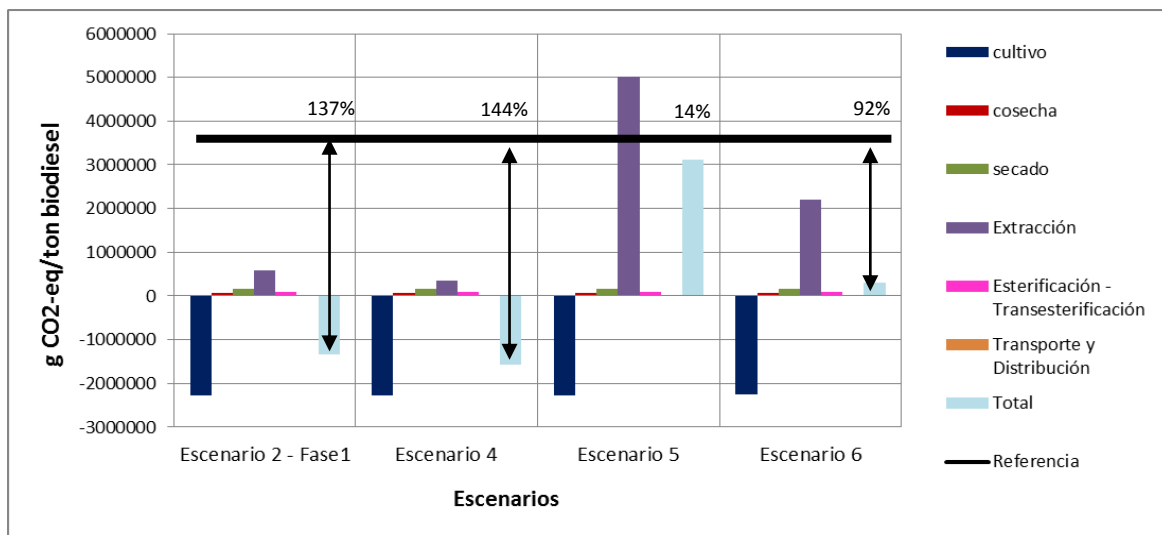
**Figura 67. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Contribución por etapas.**



Con el fin de evaluar el cumplimiento teórico respecto a los criterios de sostenibilidad propuestos en la Directiva Europea 2009/28/CE mencionado anteriormente, se ha calculado las emisiones de gases de efecto invernadero asociado a los tres escenarios de producción, transporte y distribución de biodiesel de microalgas dentro del marco de Análisis de Ciclo de Vida de la cuna a la tumba sin tener en cuenta la combustión del biodiesel.

Los resultados mostrados en la figura 69 indican una reducción significativa de los gases de efecto invernadero para los escenarios 2 como se vio anteriormente y el escenario 4, estos presentan reducciones de 137% y 144%, lo que puede explicarse debido a la gran captura de CO<sub>2</sub> durante la etapa de cultivo para la producción de biomasa. Esta reducción decrece a un 92% en el escenario 6. El escenario 5 presenta una reducción pequeña de GEI. Para el cálculo del porcentaje de reducción de GEI se usó la ecuación 12.

**Figura 68. Análisis de emisiones de gases de efecto invernadero (g CO<sub>2</sub>-eq/ ton biodiesel) para los escenarios de la fase 2.**



A partir de los resultados anteriores se observó que los escenarios que presenta un mejor comportamiento ambiental son el escenario 2 y escenario 4, mostrándose que entre las etapas del cultivo hasta el transporte y distribución presenta una reducción significativa de gases de efecto invernadero comparado con el escenario 5 y 6.

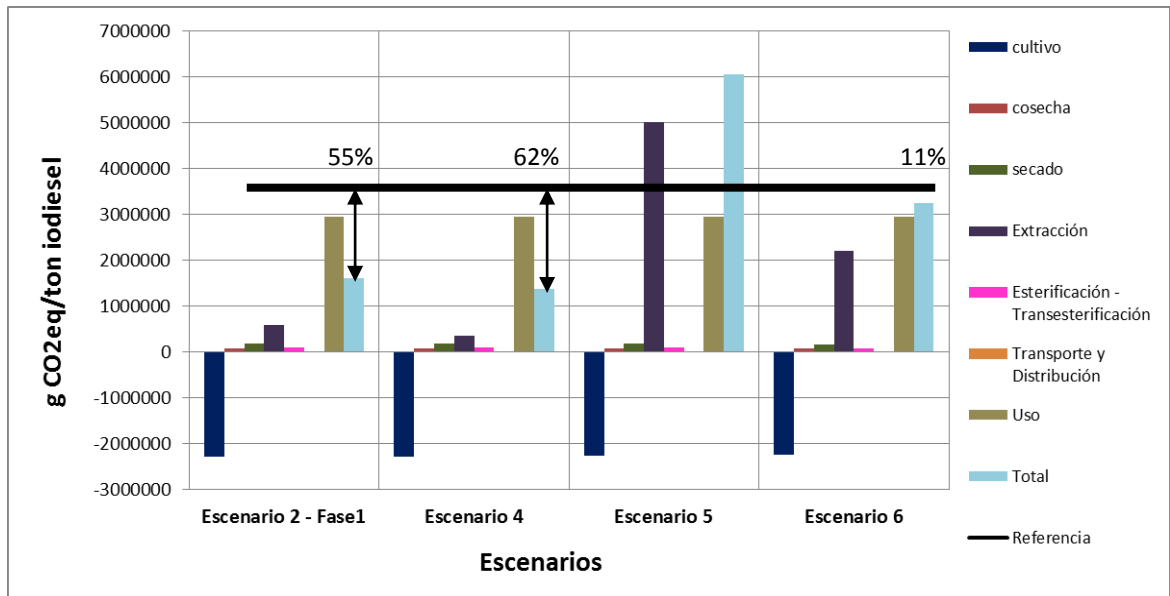
### **Emisiones de gases de efecto invernadero de la producción, transporte-distribución y uso de los escenarios estudiados en la fase 2.**

Para calcular los ahorros de emisiones de gases de efecto invernadero habría que considerar el ciclo completo de vida de la cuna a la tumba (Cradle-to-grave, C2G por sus siglas en inglés), es decir, las emisiones desde el inicio del proceso en el cultivo de la microalga, hasta las emisiones generadas por la combustión del biodiesel en el motor del vehículo.

En este sentido, se han calculado las emisiones de gases de efecto invernadero originadas por el uso de biodiesel puro estudiado en un vehículo como se mostró en el apartado 2.6.2.7.

La reducción total teniendo en cuenta todo el ciclo completo se realizó comparando el escenario 2 con cada uno de los escenarios estudiados en la fase 2 usando la ecuación 12 y estos son mostrados en la figura 70. Teniendo en cuenta las emisiones de todos los gases de efecto invernadero se obtiene que, la producción de biodiesel y uso de biodiesel puro en los escenarios 2 y 4 evita la emisión de 1996807g de CO<sub>2</sub> equivalentes por cada ton producido y 2218607g de CO<sub>2</sub> equivalentes por cada ton producido respectivamente, lo que manifiesta un porcentaje de ahorro de 55% y 62% respectivamente, mientras que los escenarios 5 no presentan ninguna reducción neta con el valor de referencia y el escenario 6 una reducción del 11%.

**Figura 69. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero (g CO<sub>2</sub>-eq/ton biodiesel) para los escenarios estudiados en la fase 2 teniendo en cuenta el ciclo completo.**



En el ciclo de vida del biodiesel de microalgas, las mayores emisiones de gases efecto invernadero se producen en la etapa de uso para los escenarios 2, 4 y 6, seguido por la etapa de extracción para los escenarios 2 y 6 y por la etapa de secado para el escenario 2; en el escenario 5 las mayores emisiones son debidas a la etapa de extracción de aceite. Se evidencia una reducción en la etapa de cultivo para los cuatro escenarios, lo que puede explicarse debido a la gran captura de CO<sub>2</sub> de la microalga.

La siguiente tabla muestra los valores de las emisiones de GEI en el ciclo de vida completo de cada uno de los escenarios de la fase 2 y el porcentaje de reducción o ahorro de emisiones en función del estándar de la Directiva 2009/28/EC (83,8 g CO<sub>2</sub> eq/MJ diésel).

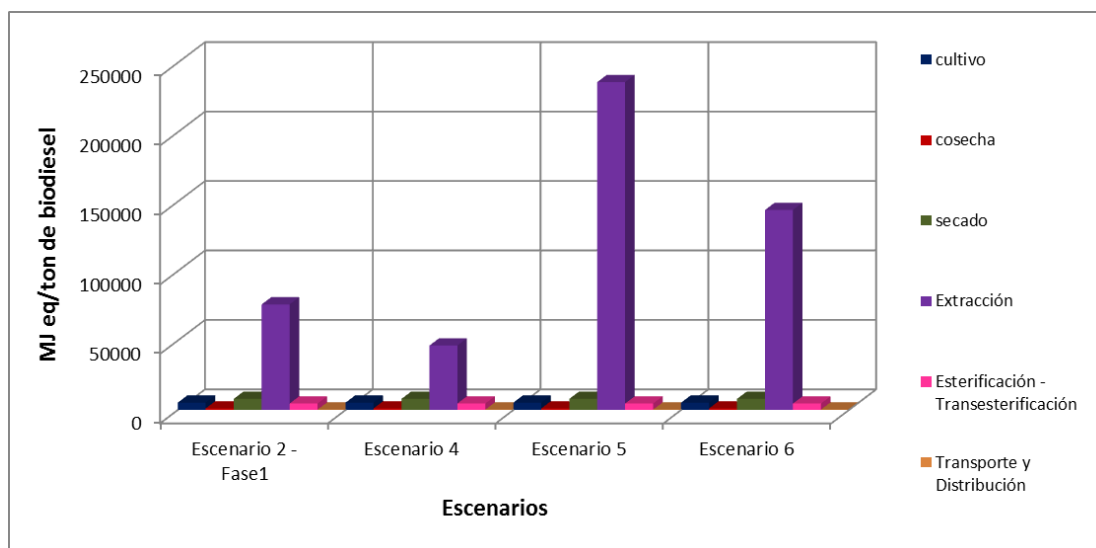
**Tabla 37. Emisiones de GEI (C2G) de los escenarios 2, 4, 5 y 6 y porcentaje de ahorro de emisiones.**

Escenarios	Cultivo	Cosecha	Secado	Extracción	E - T	Transporte y Distribución	Uso	Total	% de ahorro
Escenario 2	-2281620	79162	172881	577485	87965	18171	2952549	1606593	55
Escenario 4	-2281620	79162	172881	355694	87958	18169	2952549	1384793	62
Escenario 5	-2281620	79162	172881	5025565	87790	18134	2952549	6054462	-68
Escenario 6	-2281620	79162	172881	2196931	86820	17934	2952549	3224657	11

E-T: Esterificación - Transesterificación

**3.2.2.2. Categoría de consumo de energía fósil:** A continuación en la figura 71, se presenta la contribución a la energía fósil consumida por cada una de las etapas de ciclo de vida para los escenarios estudiados en la fase 1.

**Figura 70. Contribución al consumo de energía fósil en MJeq/ton de biodiesel.**



Como era de esperar a partir de los resultados del inventario y de los resultados de impactos ambientales del Ciclo de Vida, la etapa que da lugar a la mayor contribución en el consumo de energía fósil es la extracción de aceite para los escenarios en estudio en 75996 MJ-eq/ton, 46400 MJ-eq/ton, 236051MJ-eq/ton y 143971MJ-eq/ton biodiesel, seguido por la etapa de secado en 7994 MJ-eq/ton como se observa en la tabla 38. De igual manera, se muestra que el escenario 4 es el presenta un menor consumos de energía fósil respecto a los demás escenarios analizados.

A partir de los datos de energía fósil consumida y la energía contenida en el biodiesel, se calculó el Ratio de Energía Fósil (REF), relaciona la cantidad de energía contenida en el combustible (PCI), con la energía fósil consumida para producirlo y distribuirlo.

**Tabla 38. Contribución del ciclo de vida de los escenarios de la fase 2 al consumo de energía fósil (MJ-eq/ton de biodiesel).**

Escenarios	Cultivo	Cosecha	Secado	Extracción	Esterificación - Transesterificación	Transporte y Distribución	Total
Escenario 2	5314	1157	7994	75996	4685	313	95460
Escenario 4	5313	1157	7994	46400	4685	313	65862
Escenario 5	5314	1157	7994	236051	4676	312	255505
Escenario 6	5314	1157	7994	143971	4624	309	163369

El ratio de energía fósil y el consumo de energía fósil de la producción de biodiesel de los escenarios analizados en este estudio de ACV se muestran en la tabla 39. Para el análisis, se tomó como se mencionó anteriormente un PCI para el biodiesel de 37,8 MJ/kg.

**Tabla 39. Contribución de los escenarios de la fase 2 al consumo de energía fósil (MJeq/ton de biodiesel) y el ratio de energía fósil.**

	Escenario 2	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6	Unidades
Energía Fósil	95460	65862	255505	163369	MJ-eq/ton biodiesel
Ratio de Energía Fósil (REF)	0,40	0,57	0,15	0,23	MJ biodiesel/MJ fósil

El escenario 2 presenta un REF de 0,40 MJ de energía producida/MJ de energía de fósil, el escenario 4 de 0,57 MJ de energía producida/MJ de energía de fósil, el escenario 5 de 0,15 energía producida/MJ de energía de fósil y el escenario 6 de 0,23 energía producida/MJ de energía de fósil respectivamente, lo que demuestra que el escenario 4, tiene un ratio de energía sustancialmente mejor que los otros tres casos, esto se debe a que presenta un menor consumo de energía fósil en el sistema de extracción de aceite comparado con los demás escenarios analizados.

A continuación, se presentan los resultados de las emisiones de impactos ambientales potenciales de los escenarios evaluados en la fase 2 para las otras cuatro categorías de impacto según el método EPD (2007).

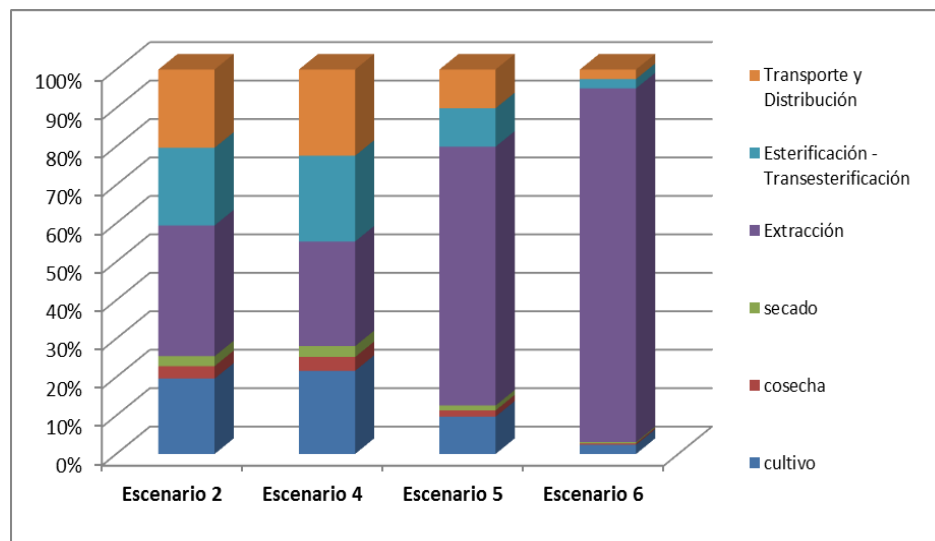
**3.2.2.3. Agotamiento Capa de Ozono Estratosférico (ACO):** Se ha calculado el potencial de destrucción de ozono estratosférico originado en los escenarios analizados. Los resultados se muestran en la tabla 40 y en la figura 72 el porcentaje de contribución de esta categoría de impacto.

**Tabla 40. Agotamiento de la capa de ozono (kg FC11eq/ton biodiesel).**

	cultivo	cosecha	secado	Extracción	Esterificación - Transesterificación	Transporte y Distribución	Total
<b>Escenario 2</b>	0,000025	0,000004	0,000003	0,000043	0,000026	0,000026	0,00013
<b>Escenario 4</b>	0,000025	0,000004	0,000003	0,000031	0,000026	0,000026	0,00012
<b>Escenario 5</b>	0,000025	0,000004	0,000003	0,000173	0,000026	0,000026	0,00026
<b>Escenario 6</b>	0,000025	0,000004	0,000003	0,000954	0,000025	0,000026	0,00103

Las etapas que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto para los escenarios 5 y 6 son la extracción de aceite en primer lugar con un 67% y 92%, seguido del proceso de Esterificación - Transesterificación, del transporte y distribución en un 10 % y 2%. Las otras etapas tienen un porcentaje de contribución menor.

**Figura 71. Porcentaje de contribución por etapas en el Agotamiento de la Capa de Ozono.**



Para el escenario 4 la etapa que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto es la extracción en primer lugar con un 27%, seguido del proceso de Esterificación - Transesterificación, del transporte y distribución en un 22% y por último la etapa de cultivo con un 22%. Las otras etapas tienen un porcentaje de contribución menor.

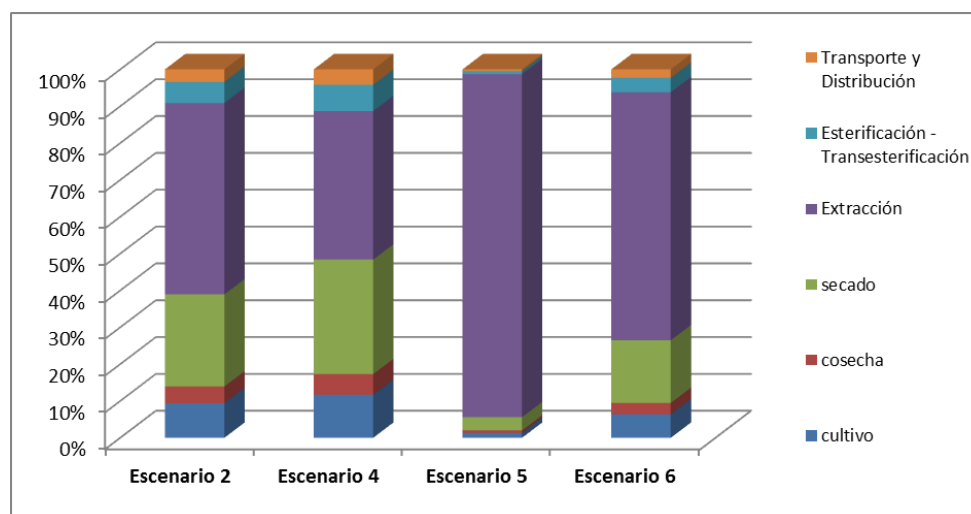
**3.2.2.4. Formación de ozono troposférico (FOT):** Se ha analizado la formación del ozono troposférico calculado en kilogramos de etileno para las distintas etapas del proceso en los escenarios estudiados de la fase 2. Los resultados se muestran en la tabla 41 y en la figura 73, donde se muestra el porcentaje de contribución de esta categoría de impacto.

**Tabla 41. Formación del Ozono Troposférico (kg C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/ton de biodiesel).**

	cultivo	cosecha	secado	Extracción	Esterificación - Transesterificación	Transporte y Distribución	Total
<b>Escenario 2</b>	0,090	0,053	0,075	0,660	0,073	0,043	0,994
<b>Escenario 4</b>	0,090	0,053	0,075	0,412	0,073	0,043	0,746
<b>Escenario 5</b>	0,090	0,053	0,075	8,236	0,073	0,043	8,570
<b>Escenario 6</b>	0,090	0,053	0,075	1,242	0,072	0,043	1,571

Las etapas que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto para los escenarios 4 y 6 son la extracción de aceite en primer lugar con 55% y 79%, seguido del proceso de secado en un 10% y 5% y por último la etapa de cultivo en un 12% y 6% respectivamente. Las otras etapas tienen un porcentaje de contribución menor.

**Figura 72. Porcentaje de contribución por etapas en la Formación de ozono troposférico.**



Para el escenario 5 la etapa que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto es la extracción de aceite en primer lugar con un 96% y las demás etapas tienen un porcentaje de contribución menor (1%).

**3.2.2.5. Acidificación (ACD):** Se ha calculado la acidificación generada en los procesos de producción de biodiésel. El cálculo se ha determinado en kg SO<sub>2</sub>eq emitidos por ton de biodiésel producido. La tabla 42 y la figura 74 presentan la contribución de las diferentes etapas en el ciclo de vida.

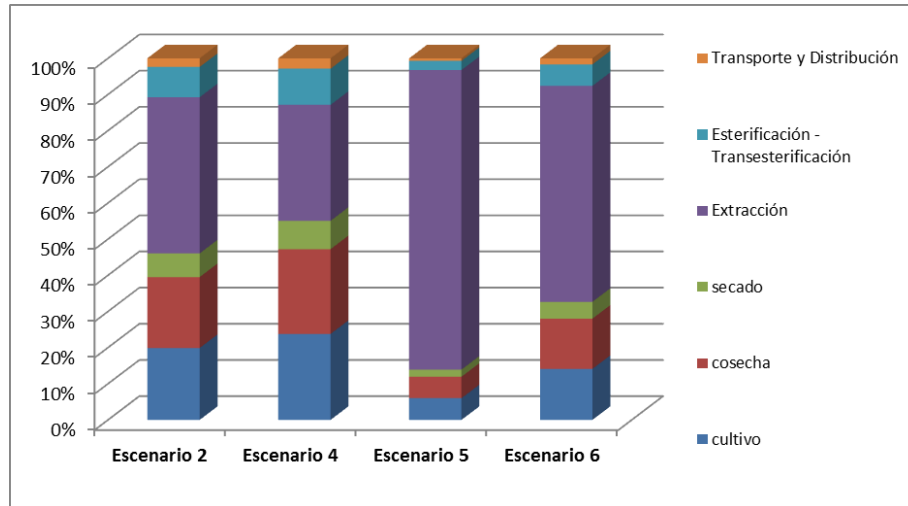
**Tabla 42. Formación del Ozono Troposférico (kg SO<sub>2</sub>eq /ton de biodiésel).**

	cultivo	cosecha	secado	Extracción	Esterificación - Transesterificación	Transporte y Distribución	Total
Escenario 2	1,11	1,09	0,37	2,41	0,47	0,13	5,57
Escenario 4	1,11	1,09	0,37	1,49	0,47	0,13	4,66
Escenario 5	1,11	1,09	0,37	15,26	0,47	0,13	18,42
Escenario 6	1,09	1,08	0,36	4,63	0,46	0,13	7,76

Las etapas que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto para los escenarios 4 y 6 son la extracción de aceite en primer lugar con 32% y 60%,

seguido de la etapa de cosecha y la etapa de cultivo en un 24% y 14% respectivamente. Las otras etapas tienen un porcentaje de contribución menor.

**Figura 73. Porcentaje de contribución por etapas en la Acidificación.**



Para el escenario 5 la etapa que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto es la extracción de aceite en primer lugar con un 83%, seguido del proceso de cosecha y cultivo con 6%. Las etapas de secado, esterificación – transesterificación y transporte – distribución tienen un porcentaje de contribución menor.

**3.2.2.6. Eutrofización (EUT):** Se ha calculado la Eutrofización generada en los escenarios en estudio. La tabla 43 y la figura 75 presentan la contribución de las diferentes etapas en el ciclo de vida de la producción de biodiésel, expresados en kg de PO<sub>4</sub>eq/ton de biodiésel.

**Tabla 43. Formación del Ozono Troposférico (kg PO<sub>4</sub>eq/ton de biodiesel).**

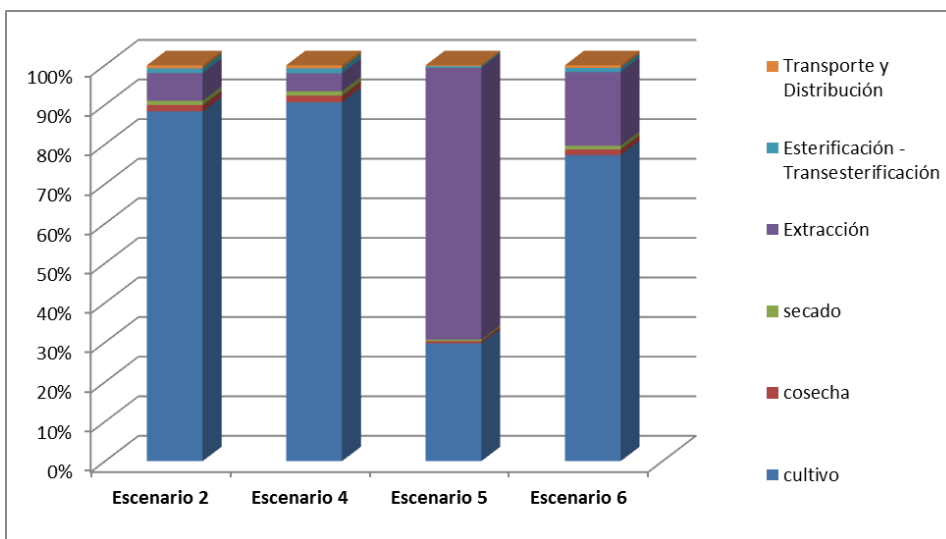
	cultivo	cosecha	secado	Extracción	Esterificación - Transesterificación	Transporte y Distribución	Total
<b>Escenario 2</b>	2,29	0,04	0,03	0,18	0,03	0,02	2,60
<b>Escenario 4</b>	2,29	0,04	0,03	0,11	0,03	0,02	2,53
<b>Escenario 5</b>	2,29	0,04	0,03	5,28	0,03	0,02	7,69
<b>Escenario 6</b>	2,29	0,04	0,03	0,54	0,03	0,02	2,93

Las etapas que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto en los escenarios 4 y 6 es la etapa de cultivo en primer lugar con un 91% y 77%, seguido del proceso extracción en un 5% y 19%. Las otras etapas tienen un porcentaje de contribución menor.

Para el escenario 5 la etapa que en mayor medida contribuyen a esta categoría de impacto es la extracción de aceite en primer lugar con un 69%, seguido de la etapa de cultivo con 30% de contribución. Las demás etapas del proceso tienen un porcentaje de contribución menor.

A partir de los resultados de evaluación de impactos ambientales potenciales realizados a los escenarios evaluados en la fase 2, se puede evidenciar que los escenarios 2 y 4 presentan los mejores perfiles ambientales. Luego de realizar la comparación con los criterios de sostenibilidad europeos mostraron una reducción hipotética de GEI y un menor consumo de energía fósil respecto a los escenarios 5 y 6.

**Figura 74. Porcentaje de contribución por etapas a la Eutrofización.**



Los resultados de los escenarios 2 y 4 aun siendo los que presenta el mejor comportamiento ambiental, se observó que el escenario 4 presenta el mejor perfil ambiental ya que tiene una mayor reducción de GEI (144%) y un menor consumo de energía fósil respecto al escenario 2 (137%).

#### **4. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS O ÁREAS DE MEJORAS AL PROCESO DE BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS**

En el estudio de ACV realizado se han detectado algunas áreas de mejora de los escenarios estudiados que se describen a continuación:

En la producción y distribución de biodiesel de microalgas, los mayores consumos energéticos se producen en las etapas de extracción y secado, por lo que la optimización energética de estos procesos permitiría mejorar los balances energéticos del biodiesel.

En el proceso de extracción de aceite y el proceso de secado, la principal entrada de energía es el gas natural empleado como combustible para la generación de energía térmica. Por tanto, el uso de biomasa como generador de energía o la instalación de sistemas de cogeneración en las plantas de extracción de aceite y secado de microalgas permitiría reducir, por una parte el consumo de energía fósil, y por otra, las emisiones de gases de efecto invernadero.

Para mejorar la eficiencia energética también sería importante aumentar el rendimiento de aceite de la microalga, con esto sería encontrar especies de microalgas para obtener biodiesel con mayores rendimientos de aceite por hectárea.

En cuanto a las emisiones de gases de efecto invernadero, las mayores emisiones del ciclo de vida (C2G) se producen en la etapa de extracción de aceite y secado (Escenarios 2, 4, 5 y 6) debido a la combustión del gas natural de la planta para producir la energía térmica necesaria en el proceso. Las emisiones de CO<sub>2</sub> podrían reducirse sustancialmente si, en lugar de gas natural, se usa biomasa ya que todo el CO<sub>2</sub> emitido habría sido fijado previamente en la etapa de producción

de biomasa. Así mismo la optimización de los consumos energéticos lleva asociada la minimización de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, es necesario identificar y desarrollar alternativas que permitan disminuir el uso de nutrientes en este caso urea y triplesuperfosfato, provenientes de recursos fósiles. En este sentido, es conveniente emplear recursos renovables de nutrientes. Una posible alternativa podría ser el uso de aguas residuales de origen agroindustrial o doméstico, puesto que las mismas son ricas en nitrógeno y fosfato, las cuales ayudan al crecimiento de las microalgas. Esta alternativa, permitiría disminuir el uso de un recurso natural tal como el agua de mar.

Finalmente, resulta imprescindible la consideración de estrategias de producción basadas en el concepto de 'biorefinería', donde los componentes restantes de la biomasa de microalgas después de extraer los lípidos (BLL), pueden ser transformados en productos tales como: alimento para ganado, extracción de pigmentos naturales, producción de bioetanol y el uso de la digestión anaerobia para obtener biogás o metano. Este biogás servirá como fuente primaria de energía para el procesamiento de la biomasa de microalgas. El dióxido de carbono generado por la combustión del biogás se puede reciclar para la producción de biomasa de microalgas en la etapa de cultivo [33, 70].

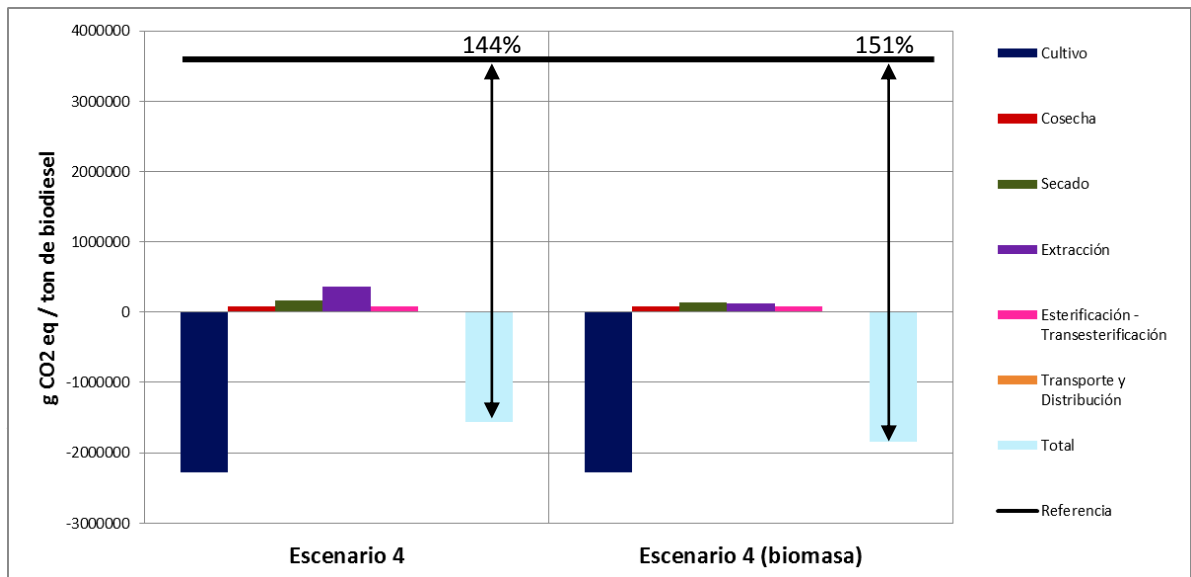
#### **4.1 PRIMERA APROXIMACIÓN A MEJORAS EN EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL**

A partir de los resultados obtenidos en la aplicación de Análisis de Ciclo de Vida en el proceso de producción de biodiesel de microalgas, en este apartado se pretende hacer una primera aproximación de una de las mejoras propuestas con el fin de observar como es el comportamiento ambiental del proceso cuando se le es modificado el consumo de gas natural por el uso de biomasa para generar energía térmica.

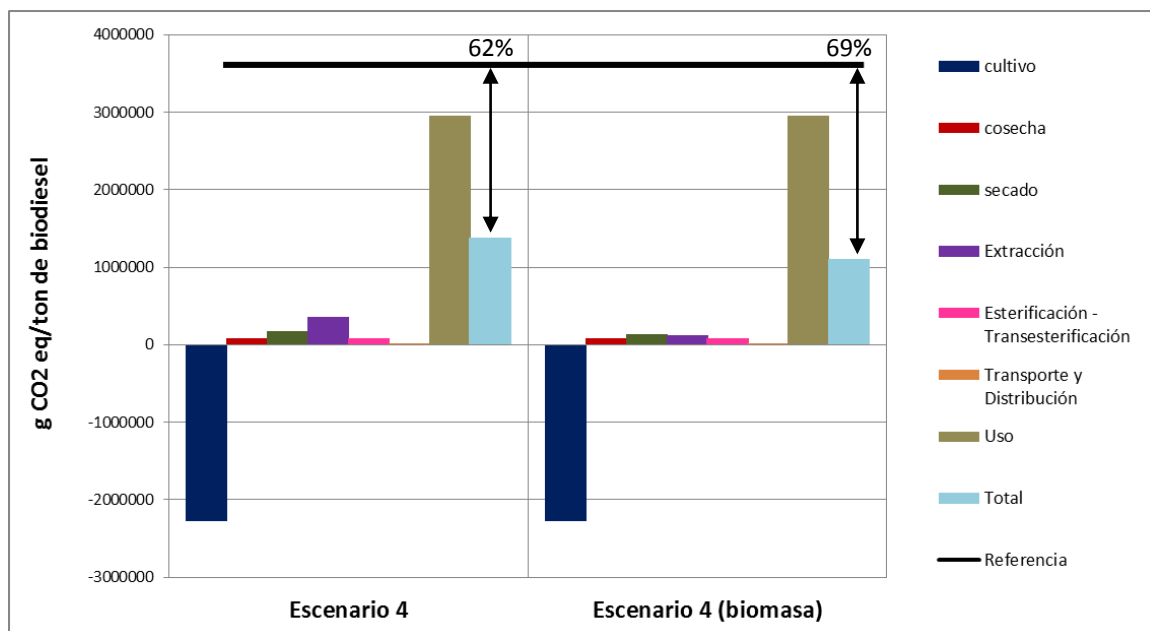
Lo primero que se realizó fue crear el escenario de generación de calor a partir de biomasa en SimaPro (ver anexo K) tomando datos de la base de datos de BUWAL 250 (1996) y datos de emisiones al aire de generación de calor con biomasa [138]. Este escenario fue remplazado por las corrientes de consumo de calor a partir de gas natural de cada proceso unitario del escenario con el mejor perfil ambiental obtenido en el apartado anterior (escenario 4), luego de esto se realizó una comparación de reducción de gases de efecto invernadero y de consumo de energía fósil.

Los resultados de comparación de GEI realizada del proceso de producción de biodiesel a partir de microalgas usando calor a partir de gas natural (escenario 4) y calor a partir de biomasa (escenario 4 biomasa) son mostrados en la figura 76, donde se refleja que el uso de biomasa para generación de energía térmica presenta una mayor reducción de GEI comparada con el escenario 4.

**Figura 75. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero (g CO<sub>2</sub>-eq/ton de biodiesel) usando gas natural como fuente de energía térmica y biomasa.**

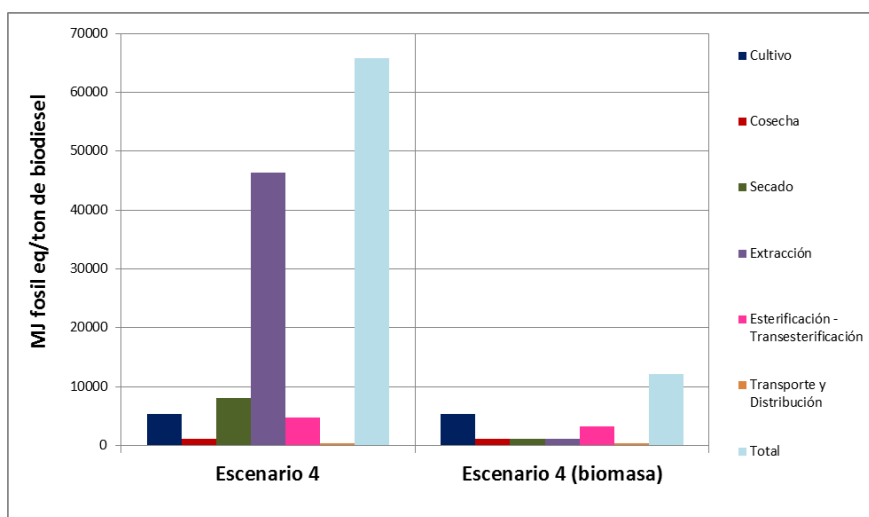


**Figura 76. Ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero (g CO<sub>2</sub>-eq/ton de biodiesel) para los escenarios estudiados teniendo en cuenta el ciclo completo.**



Por otro lado el uso de biomasa reduce el consumo de energía fósil de manera muy significativa, esto se evidencia en la figura 78 donde este consumo reduce de 65862 MJ fósil-eq/ton a 12174 MJ fósil-eq/ton.

**Figura 77. Contribución al consumo de energía fósil en MJ-eq/ton de biodiesel.**



## 5. CONCLUSIONES

Este estudio, pionero en evaluar un escenario Colombiano de producción de biodiesel a partir de microalgas, confirman los beneficios potenciales de las microalgas como un sumidero de gases de efecto invernadero. En general, los resultados muestran que el consumo de combustibles fósiles, en términos de gas natural para generación de calor, es el factor más importante en cuantificación de impactos, dejando en evidencia la necesidad de la reducción del consumo energético. Por otra parte, los resultados obtenidos, establecen que es necesario hacer algunas mejoras técnicas en la etapa de extracción de aceite para aumentar la eficiencia en los resultados relacionados con los gases de efecto invernadero (GEI).

Al comparar los procesos de recolección de biomasa en los escenarios evaluados en fase 1, se observó que el escenario 2 (método de floculación química hidráulica) presenta el consumo de energía más bajo comparado con los escenarios 1 (método de floculación química mecánica) y 3 (método de floculación microbiana hidráulica). Siendo el método de recolección de biomasa por floculación química hidráulica (escenario 2) que presenta un mejor perfil ambiental y energético.

Comparando los procesos de extracción de aceite en los escenarios de la fase 2, se observó que el escenario 4 (extracción hexano EH) presenta el consumo de energía más bajo y el mejor perfil ambiental comparado con los escenarios 2 (método de extracción HE 33:1), 5 (método de extracción EEH) y 6 (método de extracción EMC). De la misma manera, los resultados indican que los requerimientos energéticos de los procesos de extracción (extracción de aceite, el secado de sólidos y la recuperación de solvente) en cada caso se deben

principalmente a la recuperación de solventes y permiten identificar al escenario 5 con los mayores requerimientos energéticos.

Para las emisiones de gases de efecto invernadero, en comparación con los criterios de sostenibilidad Europeos mostraron una reducción hipotética tomando todo el ciclo completo en cinco de los seis escenarios analizados. El escenario 4 presenta la reducción más importante en un 62% tomando todo el ciclo completo en un marco C2G, respecto a la referencia fósil. En los demás escenarios, la reducción disminuye a causa del mayor consumo de energía, el escenario 1, 2, 3 y 6 presentan una reducción de aproximadamente del 55,34%, 55,41%, 27,40% y 11% respectivamente en un marco C2G tomando todo el ciclo completo y el escenarios 5, no presenta ninguna reducción.

Al considerar todo el ciclo completo, se consigue cerrar el ciclo de carbono en la producción de biodiesel proveniente de microalgas, esto quiere decir, que todo el CO<sub>2</sub> emitido durante el ciclo de vida de dicho producto -desde el cultivo de las microalgas hasta la etapa de uso-, es fijado nuevamente durante el crecimiento de las algas, de manera que se cierra el ciclo y se reducen las emisiones. Bajo este enfoque, se consigue una doble reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que la combustión del biodiesel proveniente de microalgas, no tiene ningún impacto en el balance de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, dado su carácter biogénico.

En términos de impacto ambientales potenciales, para todos los escenarios, la etapa de recolección de biomasa, secado, esterificación-transesterificación y transporte-distribución presentan contribuciones menos importantes. En cuanto a las diferencias entre los escenarios de producción de biodiesel analizados, el escenario 4 presenta un mejor desempeño ambiental en todas las categorías analizadas.

Respecto a otras categorías de impacto, cabe destacar las diferencias encontradas en acidificación y eutrofización. Por una parte, los escenarios evaluados en la fase 1 poseen mayores emisiones de precursores de acidificación y eutrofización en las etapas de extracción, secado y cosecha debidas principalmente al uso de flocculantes (sulfato de aluminio y anilina), solventes (hexano, cloroformo-metanol y etanol) y al consumo de energía. De esta manera, los escenarios evaluados en la fase 2 poseen mayores emisiones en las etapas de cultivo, secado y extracción debidas principalmente al uso de nutrientes, solventes y energía.

En este sentido, es necesario buscar alternativas para disminuir el consumo de energía. De un lado, estas alternativas pueden estar relacionadas con mejoras técnicas en la etapa de extracción de aceite con el fin de aumentar la eficiencia. Otro aspecto también de importancia es el aumento del rendimiento en la extracción de aceite de la microalga, para ello es necesario encontrar especies de microalgas que permitan obtener biodiesel con mayores rendimientos de aceite por hectárea. Por otro parte, las opciones pueden estar relacionadas con cambios en las fuentes de energía, por ejemplo, el uso de la biomasa como alternativa para la generación de calor.

El uso de biomasa como alternativa en la generación de calor, se muestra como una opción viable en la reducción del consumo de energía fósil. Así que, al implementar biomasa como generador de calor en el escenario 4 se aprecia una reducción importante en el consumo de energía fósil y de esta manera se observan ahorros en emisiones de gases de efecto invernadero del 69% tomando todo el ciclo completo.

## 6. DIVULGACIÓN DE RESULTADOS (Publicaciones, eventos y tesis)

Se han publicado cuatro artículos referenciados en base de datos de SCOPUS, uno en la revista Chemical Engineering Transactions, dos en Computer Aided Chemical Engineering y un artículo en la revista prospectiva y por último, uno fue aceptado para publicación en la revista CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro de ECOPEPETROL.

- PARDO Y., SANCHEZ E., KAFAROV V. "Life Cycle Assessment of Third Generation Biofuels Production". Chemical Engineering Transactions ISSN: 1974-9791. Editorial AIDIC v.21 fasc.N/A p.1177 - 1182, 2010.
- PARDO, Yeniffer; PERALTA, Yeimmy; GONZALEZ, Angel; KAFAROV, Viatcheslav. "Computer aided evaluation of eco-efficiency of solvent-based algae oil extraction processes for biodiesel production". Computer Aided Chemical Engineering, Elsevier, Volume 30, 2012, Pages 86-90
- PARDO CÁRDENAS, Yeniffer; PERALTA RUIZ, Yeimmy Yolima; CANCHILA ROMERO, Hames David; KAFAROV, Viatcheslav. Implementación de la metodología de síntesis y análisis de procesos a la etapa de cosecha de microalgas para la producción de biodiesel. Revista prospectiva.
- PARDO CÁRDENAS, Yeniffer; HERRERA OROZCO, Israel; GONZÁLEZ DELGADO, Ángel; KAFAROV, Viatcheslav. Environmental assessment of microalgae biodiesel production in Colombia: Preliminary results for oil extraction processes in a based biorefinery. CT&F - *Ciencia, Tecnología y Futuro*. Proceso de edición. Primera edición de 2013.

Igualmente se realizó divulgación de resultados obtenidos durante la investigación en eventos nacionales e internacionales los cuales han sido publicados en memorias, estos se mencionan a continuación:

- PARDO, Yeniffer; PERALTA, Yeimmy; GONZALEZ, Angel; KAFAROV, Viatcheslav. “Evaluation of sustainability of solvent extraction process for algae bio-diesel production”. V Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Biocombustibles CIBSCOL 2012. Bucaramanga (Colombia), Junio 2012. (ISBN 978-958-46-0616-7).
- 8th European Congress of Chemical Engineering and 1<sup>ST</sup> European Congress of Applied Biotechnology. “Exergy and Environmental Analysis (Exea) of Microalgae Oil Extraction for Third Generation Biofuels Production”. Presentación Poster. Duración 5 días, 25 – 29 septiembre de 2011. Berlín, Alemania.
- ROJAS, Martha Rocío; PARDO CÁRDENAS, Yeniffe; PERALTA RUIZ, Yeimmy Yolima; KAFAROV, Viatcheslav. “Comparación de dos rutas de extracción de aceite de microalgas mediante evaluación exergética y de impactos ambientales”. XII Seminario Internacional del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible SIMADS 2011. Bucaramanga (Colombia), Agosto, 2011. (ISBN: 978-958-46-0101-8). XXVI Congreso Colombiano de Ingeniería Química “Energía y Desarrollo Sostenible”. Bucaramanga (Colombia), Septiembre 2011. (ISSN 1692-925X).

Finalmente, dentro de este estudio se desarrolló cuatro tesis de pregrado (finalizadas y sustentadas) codirigidos por las estudiantes de maestría Yeimmy Yolima Peralta y Yeniffer Pardo y dirigidas por el Dr. Viatcheslav kafarov.

- BAUTISTA BUENO, Jeberth Andrehy; SIERRA AVENDAÑO, Ángel Jhoan. “Evaluación Exergética del Proceso de Producción de Bioetanol a partir de Biomasa Residual de la Microalga *Chlorella Vulgaris*”. Ingeniería Química, UIS, 2012.
- CAMACHO CADENA, Peter Giovany; MARTÍNEZ GONZÁLEZ, John Jairo. “Simulación del proceso de producción de bioetanol a partir de biomasa residual de microalgas obtenida como subproducto de la producción de biodiesel de tercera generación”. Ingeniería Química, UIS, 2011.
- ROJAS INFANTE, Martha Rocío. “Análisis comparativo de impactos ambientales de la etapa de extracción de aceite de la microalga *Chlorella sp.*”. Ingeniería Química, UIS, 2011.
- CANCHILA ROMERO, Hames David. “Implementación de la metodología de síntesis y análisis de procesos a la etapa de cosecha de microalgas para la producción de biodiesel”. Ingeniería Química, UIS, 2011.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Demirbas A. (2010). Use of algae as biofuel sources. *Energy Convers Manage*, 51:2738–2749.
- [2] Pant D., Olsen S.I. and Nigam P.S. (2012). Key issues to consider in microalgae based biodiesel production. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*. Volume (issues) **29(1)**: 687-700
- [3]. Tsukahara K and Sawayama S. (2005). Liquid fuel production using microalgae. *J Jpn Petrol, Inst*; 48(5):251–9
- [4]. McKendry P. (2003). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Biores Technol*; 83:47–54.
- [5]. Hall, D.O., H.E. Mynick and R.H. Williams. (1991). Cooling the greenhouse with bioenergy. *Nature*, 353:11.
- [6]. Macedo, I.D.C. (1999). Energy from biomass and wastes. *Biomass Bioenergy*, 3: 77-80.
- [7]. FAO, Oil production. FAO Corp Doc Repository. <[www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e0h.htm](http://www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e0h.htm)>
- [8]. Huntley M. E. and RedalJe D. G., (2004). “CO<sub>2</sub> Mitigation and Renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal.” *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* xxx:1-36.

- [9]. Vieira C. (2004). Producción de biodiesel a partir de microalgas. 1er Congreso Latinoamericano sobre Biotecnología Algal. Argentina. ISBN N° 987- 1130-32-5.
- [10]. Fleischer G. and Schmidt W.P. (1997). Iterative Screening LCA in an Eco-Design Tool, SETAC.
- [11]. Fava, J. A., Denison R., Jones B., Curran M. S., Vigon B., Selke S., and Barnum J. (1991). A technical framework for life-cycle assessments. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). Washington, DC. Pp. 134.
- [12]. Turton R., Bailie R., Whiting W. and Shaeiwitz J. (1998). Analysis Synthesis, and Design of Chemical Processes. Prentice Hall.
- [13]. Sánchez E. (2011). Desarrollo de un proceso para el aprovechamiento integral de microalgas para la obtención de biocombustibles. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanaga.
- [14]. Douglas J. (1988). Conceptual Design of Chemical Processes. McGraw-Hill International Editions, Chemical Engineering Series.
- [15]. Korevaar G. (2000). Sustainability in process design methodology. In proceedings 21st annual European AIChE. Hague.
- [16]. United Nation Environmental Program (UNEP) (1998). Evaluation of environmental impacts in life cycle assessment. Meeting report. Brussels.
- [17]. [www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf](http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf).

- [18]. Borowitzka, M.A. and Borowitzka, L.J. (1988). *Dunaliella*. In: *Microalgal Biotechnology*, Borowitzka, MA & Borowitzka, LJ (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 27-58.
- [19]. Benemann J.R., Dunahay T., Roessler P. and Sheehan J. (1998). A look back at the U.S Department of Energy's Aquatic Species Program-Biodiesel from Algae. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, U.S.
- [20]. Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E. and Isambert, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *J. of Bioscience and Bioengineering*. Vol 101. 87- 96.
- [21]. Alvarez Cobelas M. and Zarco Lechado J. (1989). Lipids in Microalgae. A review I. *Biochemistry. Grasas y Aceites*. Vol.40, fasc. 2: 118-145.
- [22]. Guschina I. A. and Harwood L. J. (2006). Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Progress in Lipid Research*, 45:160-186.
- [23]. Philip T P. and Al Darzins. (2009). The promise and challenges of microalgal-derived biofuels. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA. Wiley InterScience, DOI: 10.1002/bbb.159; *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 3:431–440.
- [24]. Papazi A., Makridis P., Divanach P. and Kotzabasis K. (2008). Bioenergetic changes in the microalgal photosynthetic apparatus by extremely high CO<sub>2</sub> concentrations induce an intense biomass production. *Physiol Plant*. 132: 338-49.
- [25]. Ogbonna J.C. and Tanaka, H. (1996). Night Biomass Loss and Changes in Biochemical Composition of Cells during Light/Dark Cyclic Culture of *Chlorella pyrenoidosa* J. *Ferment. Bioeng.* 6: 558-564.

- [26]. Torrentera B.L. (1983). Cultivo semicontinuo de *Chlorella saccharophila* Kruger. Tesis. Esc. Nal. est. Prof. iztacala, UNAM, pp. 68. México, D.F.
- [27]. Contreras F.C., Peña C.J., Flores C.L. y Cañizares VR., (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. Vol. 28 N° 8 INERCIENCIA.
- [28]. Hirata H. and Murakoshi M. (1977). Effects of aeration volume on the growth of marine *Chlorella* in culture. Mem. Fac. Fish., Kagoshima Univ. 26:15–21.
- [29]. Hirata H., Ushiro M. and I. Hirata. (1982). Ecological succession of *Chlorella saccharophila*, *Brachionus plicatilis* and autogenous bacteria in culture water. Mem. Fac. Fish., Kagoshima Univ., 31:153–160.
- [30]. Michael B., Zhiyou Wen and Virginia Johnson. (2009). Microalgae as a Feedstock for Biofuel Production. Biological Systems Engineering, Virginia Tech.
- [31]. Molina Grima, E., F. Acien Fernandez, F. Garcia Camacho, and Y. Chisti., (1999). Photobioreactors: Light regime, mass transfer, and scale up. Journal of Biotechnology 70:231–47.
- [32]. Huntley M. E. and Redalje D. G., (2004). “CO<sub>2</sub> Mitigation and Renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal.” Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change xxx:1-36.
- [33]. Chisti Y. (2007). Biodiesel from microalgae. Biotechnol Advances 25:294–306.
- [34]. Gudín C. and Thepenier C. (1986). Bioconversion of solar energy into organic chemicals by microalgae. Adv Biotechnol Process 6:73-110.

- [35]. Olguin E., (1984). Microalgae biomass as source of chemicals, fuels, and proteins. In sixth Australian Biotechnology Conference. University of Queensland, St. Lucia Brisbane.
- [36]. Apt K. E. and Behrens P. (1999). Commercial developments in microalgal biotechnology. *J. Phycol.* 35: 215-226.
- [37]. Travieso L. and Benitez Echegoyen F, (1998). Cultivo de *Arthrospira* sp: del Laboratorio a Planta Piloto. Curso: Tecnología y aprovechamiento del cultivo heterotrófico de microalgas. Centro de Investigaciones Pesqueras. La Habana. Cuba.
- [38]. Miao X. and Wu, Q. (2006). Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. *Bioresource Technology*, Volume 97, Issue 6. pp 841-846.
- [39]. Guschina I.A. and Harwood L.J. (2006). Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Progress in Lipid Research*, 45:160-186.
- [40]. Benemann J.R., Weissman, J.C., Koopman, B.L. and Oswald, W.J. (1977). Energy production by microbial photosynthesis. *Nature*, 268: 19-23.
- [41]. Kojima, H. and Lee Y- K. (2001). Photosynthetic microorganisms in *Environmental Biotechnology*. Springer-Verlag. Hong-Kong. 310p.
- [42]. Salazar González, M. (2006). Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales. *Contactos* 59: 64-70.
- [43]. Wu T and Mao L. (2008). Influences of hot air drying and microwave drying on nutritional and odorous properties of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets. *Food Chemistry*, 110, Issue 3, 1, 647-653.

- [44]. Engler C.R. (1985). Disruption of Microbial Cells, in *Comprehensive Biotechnology*. Vol. 2. Oxford, England. M. Moo-Young, Editor, p. 305.
- [45]. Chisti, Yusuf, Moo-Young and Murray. (1986). Disruption of microbial cells for intracellular products. *Enzyme and Microbial Technology*. Vol. 8. p. 194-204.
- [46]. Richmond, Amos. (2004). *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology*. Wiley-Blackwell Publishing. 577p.
- [47]. González AD, Amaya A, Sarmiento R y Kafarov V. (2010). Development of a methodology for microalgae oil extraction using thermal and chemical cell disruption. In: *Proceedings of the XXIX Latin American Chemistry Congress – CLAQ: Cartagena, Colombia; September*.
- [48]. Bligh EJ and Dyer WJ. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can J Biochem Physiol Pharmacol*;37:911–7.
- [49]. Faerman, V., Mukmenev, I. and Shreiber, I. (2002). Sonication of Microalgae and its Precipitation. In: *Acta Acustica united with Acustica*. Vol. 88, N° 4. p. 592-593.
- [50]. González AD, Kafarov V and Guzmán A (2010). Comparison of microalgae oil extraction methods for third generation biofuel production. In: *Conference Proceedings of the 19th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA: Prague, Czech Republic; August*.
- [51]. King, J. W. (2000). Advances in critical fluid technology for food processing. *Food Science and Technology Today*. Vol. 14. p. 186–191.

[52]. Del Valle, J. M., y Aguilera, J. M. (1999). Review: high pressure CO<sub>2</sub> extraction. Fundamentals and applications in the food industry. Food Science and Technology International. 1999. Vol. 5. p. 1–24.

[53]. Ward O. P., Singh A (2005). Omega–3/6 fatty acids: Alternative sources of production. Process Biochemistry. Vol. 40, Issue 12. p. 3627-3652.

[54]. Gariba A y Hernández, Vázquez R-Duhalt, Sánchez S. M. del Pilar, Serrano C. L., Martínez J. A., (2009). Biodiesel a Partir de Microalgas. BioTecnología, Vol. 13 No. 3. Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México.

[55]. Ma F and Hanna MA., (1999). Biodiesel production: a review. Bioresour Technol. 70: 1-15.

[56]. Fukuda H, Kondo A and Noda H., (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. J. Biosci. Bioeng. 92: 405-416.

[57]. Sharma YC, Singh B and Upadhyay SN. (2008). Advancements in development and characterization of biodiesel: a review. *Fuel*. 87: 2355-2373.

[58]. Xu Han, Miao Xiaoling and Wu Qingyu. (2006). High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. Journal of Biotechnology 126, 499–507.

[59]. Kadam, K.L. (2001). Microalgae Production from Power Plant Flue Gas: Environmental Implications on a Life-Cycle Basis, National Renewable Energy Laboratory.

- [60]. Campbell P.K., Beer T. and Batten, D. (2009) Greenhouse Gas Sequestration by Algae – energy and greenhouse gas life cycle studies, in Proc. 6th Australian Life-Cycle Assessment Conference.
- [61]. Lardon L., Helias A., Sialve B., Stayer J. P. and Bernard O. (2009). Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae, *Environmental Science and Technology* 43(17):6475–6481.
- [62]. Clarens A. F., Resurreccion E. P., White M. A. and Colosi L. M. (2010). Environmental Life-Cycle Comparison of Algae to Other Bioenergy Feedstocks, *Environmental Science and Technology* 44(5):1813–1819.
- [63]. Stephenson A. L., Kazamia E., Dennis J. S., Howe C. J., Scott S. A. and Smith, A. G. (2010). Life-Cycle Assessment of Potential Algal Biodiesel Production in the United Kingdom: A Comparison of Raceways and Air-Lift Tubular Bioreactors, *Energy and Fuels* 24(7):4062–4077.
- [64]. Sander K. and Murthy G. S. (2010). Life cycle analysis of algae biodiesel. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-11.
- [65]. Campbell P. K., Beer T. and Batten D. (2011) Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds. *Bioresour. Technol.* 102 (1), 50–56.
- [66]. Khoo HH, Sharratt PN, Das P, Balasubramanian RK, Naraharisetti PK and Shaik S. (2011). Life cycle energy and CO<sub>2</sub> analysis of microalgae-to-biodiesel: Preliminary results and comparisons *Bioresour Technol*;102:5800-07.
- [67]. Li Y., Horsman M., Wu, N., Lan, C., and Dubois-Calero, N. (2008). Biofuels from microalgae. *Biotechnol Prog*, 24, 815-820.

- [68]. Illman A. M., Scragg A.H., Shales S.W. (2000). Increase in *Chlorella* strains calorific values when grown in low nitrogen medium. *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 2, pp. 631–635.
- [69]. Petkov G. and Garcia G. (2007). Which are fatty acids of the green alga *Chlorella*?. *Biochem Syst Ecol*, 35: 281-285.
- [70]. Hu, Q., M. Sommerfeld, E. Jarvis, M. Ghirardi, M. Posewitz, M. Seibert, and A. Darzins. (2008). Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *Plant J*. 54: 621-639.
- [71]. Dunstan GA, Volkman JK, Jeffrey SW, Barrett SM (1992) Biochemical composition of microalgae from the green algal classes Chlorophyceae and Prasinophyceae. 2. Lipid classes and fatty acids. *J Exp Mar Biol Ecol* 161:115–134.
- [72]. Ugwu CU, Aoyagi H, Uchiyama H. 2008. Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology* 99: 4021-4028
- [73]. Molina Grima, E., Belarbi E. H., Acien Fernandez F. G., Robles Medina A. and Chisti Y. (2003). Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnol. Adv*, 20, 491–515.
- [74]. Carlsson A., van Beilen J., Moller R., Clayton D. (2007). *Micro and macroalgae: utility for industrial applications*, University of York.
- [75]. Chun-Yen Chen, Kuei-Ling Yeh, Rifka Aisyah, Duu-Jong Lee, Jo-Shu Chang. (2011) Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*;102: 71-81.

- [76]. Divakaran R, Pillai VNS. (2002). Flocculation of algae using chitosan. *Journal of Applied Phycology*; 14(5): 419–422.
- [77]. Muñoz R, Guieysse B,. (2006). Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. *Water Research*; 40 (15) :2799–2815.
- [78]. Mohn FH,. (1980). Experiences and strategies in the recovery of biomass in mass culture of microalgae. In: Shelef G, Soeder CJ, editors. *Algal biomass*. Amsterdam: Elsevier; 547–571.
- [79]. Knuckey, R.M., Brown, M.R., Robert, R., Frampton, D.M.F. (2006). Production of microalgal concentrates by flocculation and their assessment as aquaculture feeds. *Aquacultural Engineering*; 35: 300–313.
- [80]. Brennan L. and Owende P. (2010). Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 14: 557-577.
- [81]. Mollah, M.Y.A., Morkovsky, P., Gomes, J.A.G., Kesmez, M., Parga, J., Cocke, D.L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *J. Hazard. Mater*; 114:199–210.
- [82]. Chen Y.M., Liu J.C., Ju Y.H. (1998). Flotation removal of algae from water. *Colloid. Surface*. 1998; 12: 49–55.
- [83]. Betzer, N., Argaman, Y., Kott, Y,. (1980). Effluent treatment and algae recovery by ozone-induced flotation. *Water Research*; 14:1003–1009.

- [84]. Jiang Z.L., Meng D.W., Mu H.Y. and Yoshikawa, K. (2010). Study on the hydrothermal drying technology of sewage sludge. *Sci. China Technol. Sci.* 53, 160–163.
- [85]. Hassebrauck, M. and Ermel, G. (1996). Two examples of thermal drying of sewage sludge. *Water Sci. Technol.* 33, 235–242.
- [86]. González A. D., Kafarov V and Guzmán A. (2009). Development of a methodology of microalgae oil extraction in the biodiesel from microalgae production chain. *Prospectiva*; 7:53–60.
- [87]. Freedman B., Butterfield R., Pryde E., Mounts T. (1986). Transesterification kinetics of soybean oil. *JAOCS*, 63(10),1375-1380
- [88]. Freedman, B., Pryde, E., Mounts, T. (1984). Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. *JAOCS*, 61(10),1638-1643.
- [89]. Marchetti, J.M. (2008). Esterification of free fatty acids using sulfuric acid as catalyst in the presence of triglycerides, *Biomass Bioenergy*, 32, 892–895.
- [90]. Aspen plus Manual, Aspen Technology Inc., 2006.
- [91]. Kay R. A. (1991). Microalgae as food and supplement. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 30:555–73.
- [92]. Phukan M. M. Chutia R. S. Konwar B. K. and Kataki R. (2011). Microalgae *Chlorella* as a potential bioenergy feedstock. *Appl Energ*, 88:3307-12.

- [93]. Mata T. M., Martins A. A. and Caetano N.S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renew Sustain Energy Rev*; 14:217-32.
- [94]. Ehimen E. A., Sun Z. F. and Carrington C.G. (2010). Variables affecting the in situ transesterification of microalgae lipids. *Fuel*, 89:677–84.
- [95]. Ververis C., Georghiou K., Danielidis D., Hatzinikolaou D. G., Santas P., Santas R., and Corleti, V. (2007). Cellulose–hemicellulose, lignin and ash content of some organic materials and their suitability for use as paper supplements. *Bioresour Technol*, 98:296–301.
- [96]. Li, Y., Markley, B., Mohan, A.R., Rodriguez-Santiago, V., Thompson, D., Niekerk, D.V. (2006). Utilization of carbon dioxide from Coal-fired power plant for the Production of value-added products, *Design Engineering of Energy and Geo-Environmental Systems Course (EGEE 580)*.
- [97]. Yang J, Xu M, Zhang X, Hu Q, Sommerfeld M, Chen Y. (2010). Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: Water footprint and nutrients balance. *Bioresource Technol* 102(1):159-65. doi:10.1016/j.biortech.2010.07.017
- [98]. Phukan MM, Chutia RS, Konwar BK, Kataki R. (2010). Microalgae *Chlorella* as a potential bio-energy feedstock. *Applied Energy* in press. doi:10.1016/j.apenergy.11.026.
- [99]. Sheehan, J.; Dunahay, T., Benemann J., Roessler P. (1998). A look back at the US Department of Energy's Aquatic Species Program-Biodiesel from Algae. National Renewable Energy Laboratory, [www.nrel.gov/docs/fy04osti/34796.pdf](http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34796.pdf).

- [100]. Handler R. M., Canter C. E, Kalnes T. N., Lupton F. S., Kholiqov O., Shonnard D. R., Blowers P. (2012). Evaluation of environmental impacts from microalgae cultivation in open-air raceway ponds: Analysis of the prior literature and investigation of wide variance in predicted impacts. *Algal Research*, Volume 1, Issue 1, Pages 83-92
- [101]. Kadam, K. L (2002). Environmental implications of power generation via coal-microalgae cofiring. *Energy*, 27 (10), 905–22.
- [102]. Borowitzka M. (2005). Culturing microalgae in outdoor ponds. In: Andersen RA, editor. *Algal culturing techniques*. San Diego, California: Elsevier Academic Press; p. 205–17.
- [103]. IDEAM. «Atlas climatológico de Colombia» (en español).
- [104]. Andersen, R. A. (2005). *Algal Culturing Techniques*; Elsevier Academic Press: Amsterdam, The Netherlands, (1ed).
- [105]. Razon, L. F., & Tan, R. R. (2011). Net energy analysis of the production of biodiesel and biogas from the microalgae: *Haematococcuspluvialis* and *Nannochloropsis*. *Applied Energy*, 88(10), 3507-3514.
- [106]. Cooney M. J., Young G., Pate R. (2010). Bio-oil from photosynthetic microalgae: case study. *Bioresource Technology*, doi:10.1016/j.biortech.2010.06.134.
- [107]. Peters, M., Timmerhaus, K. and West, R., (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill, New York.

- [108]. Peralta-Ruiz Y, Pardo Y., Canchila Romero H. D., Kafarov V. (2012). Implementación de la metodología de síntesis y análisis de procesos a la etapa de cosecha de microalgas para la producción de biodiesel. Prospect. Vol. 10, No. 1, págs. 132-144
- [109]. ENOHSa ente nacional de obras hídricas de saneamiento. Floculación (Cap.VII).  
[http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/materias/ing\\_sanitaria/ENOHSa%20Floculacion.pdf](http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/materias/ing_sanitaria/ENOHSa%20Floculacion.pdf)
- [110]. Andrew K. Lee, David M. Lewis, Peter J. Ashman. (2010). Energy requirements and economic analysis of a full-scale microbial flocculation system for microalgae harvesting. Journal of Chemical Engineering Research and Design; 88 (8):988-996.
- [111]. Crane (1988). Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. (McGRAW-HILL)..
- [112]. Haarhoff, J. (1998). Design of around-the-end hydraulic flocculators. J Water SRT – Aqua;47: 142–152.
- [113]. Van Gemert G.W., (2009). The Delta dryer Theoretical and Technological Development of An Energy-efficient Dryer for Sludge. Diss. Delft University of Technology, Delft.
- [114]. García, M. Gonzalo, A. Sánchez, J. Arauzo, J. Pena, J. (2010). Prediction of normalized biodiesel properties by simulation of multiple feedstock blends, Bioresour. Technol. 101: 4431–4439.

- [115]. Sánchez E., Ojeda K., El-Halwagi M. and Kafarov V. (2011). Biodiesel from microalgae oil production in two sequential esterification/transesterification reactors: Pinch analysis of heat integration. *Chem Eng J*, 176:211-6.
- [116]. Pokoo-Aikins G., Ahmed Nadim., Mahmoud M. and El-Halwagi V. (2009). Design and analysis of biodiesel production from algae grown through carbon sequestration. *Clean Techn Environ Policy*, 12:239-254.
- [117]. Peralta-Ruiz Y, González-Delgado A.-D., Kafarov V. (2012). Evaluation of alternatives for microalgae oil extraction based on exergy analysis. *Applied Energy*, Volume 101, January 2013, Pages 226-236
- [118]. Fajardo AR, Cerdan LE, Medina AR, Fernandez FGA, Moreno PAG, Grima EM. (2007). Lipid extraction from the microalga *Phaeodactylum tricornutum*. *Eur J Lipid Sci Technol*;109:120–6.
- [119]. Marchetti J.M and Errazu A.F. (2008). Esterification of free fatty acids using sulfuric acid as catalyst in the presence of triglycerides, *Biomass Bioenergy* 32 892–895.
- [120]. Tapasvi D, Wiesenborn D. and Gustafson C. (2005). Process model for biodiesel production from various feedstocks. *Am Soc Agric Eng* 48:2215-2221.
- [121]. Meher L. C, Sagar D. V. and Naik S.N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review. *Renew Sustain Energ Rev* 10:248-268
- [122]. Myint L. L. and El-Halwagi M. M. (2009). Process analysis and optimization of biodiesel production from soybean oil. *J Clean Tech Environ Policy* 11:263-276. doi: 10.1007/s10098-008-0156-5

[123]. Pardo Y., Sanchez E. and Kafarov V. (2010). Life Cycle Assessment of Third Generation Biofuels Production. Chemical Engineering Transactions ISSN: 1974-9791. Editorial AIDIC v.21 fasc.N/A p.1177 - 1182.

[124]. Zhang Y, Dubé MA, McLean D. D. and Kates M. (2003b). Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: 2. Economic Assessment and Sensitivity Analysis. Bioresource Technol 90(3):229-240

[125]. PRé “SimaPro®7.1”, PRé Consultants (2007). Amersfoort, The Netherlands (<http://www.pre.nl>).

[126]. Garraín D., Herrera I., Lago C., Lechón Y. y Sáez R. (2011). Análisis de ciclo de vida de biocarburantes de aceite vegetal hidrotratado. Colección Documentos CIEMAT. ISBN: 978-84-7834-663-9.

[127]. Vessia Oyvind. (2007). Planning of sustainable energy distribution systems Part III: A Life Cycle Assessment Perspective. In: SINTEF Energy Research. 104p. ISBN Nº 978-82-594-3294-0.

[128]. Campos A. J., Carmona G. & López F. D., (2010). Casos URE exitosos en Colombia: Reducción de los costos energéticos en sistemas de generación de vapor. Informe Técnico, Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “francisco José de Caldas” (COLCIENCIAS), 14-26.

[129]. Lechón Y, Cabal H, Rúa C, Lago C, Izquierdo L, Sáez R. M. y San Miguel M. (2006). “Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte. Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo de Biodiesel y Diésel”. CIEMAT/ASE/05-E0221/2.

- [130]. Fagerstone K, Quinn J., Marchese A., Bradley T. (2011). Quantitative Measurement of Direct Nitrous Oxide Emissions from Microalgae Cultivation, *Environmental Science & Technology*, 45, 9449–9456
- [131]. Houa J., Zhanga P, Yuana X. and Zhenga Y. (2011). Life cycle assessment of biodiesel from soybean, jatropha and microalgae in China conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 5081– 5091. doi:10.1016/j.rser.2011.07.048
- [132]. Hernández G. A., Vázquez-Duhalt R., M. Sánchez Saavedra M, Carreón L. S., Jiménez M. A. (2009). Biodiesel a Partir de Microalgas. *BioTecnología*, Vol. 13 No. 3. pp 38
- [133]. Frank E.D., Han J., Palou-Rivera I., Elgowainy A. and Wang M.Q. (2011). User Manual for Algae Life-Cycle Analysis with GREET: Version 0.0. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory. <http://www.osti.gov/bridge>.
- [134]. ISO (2006a) ISO 14040: Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. ISO Geneva.
- [135]. ISO (2006b) ISO 14044: Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines. ISO Geneva.
- [136]. Solomon, S., Qin D., Manning ., M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. and Miller H.L. (2007). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html)

[137]. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and the Council of 23 April (2009) on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, 05/06/2009, Official Journal of the European Union.

[138]. Herrera, I., Lechón, Y., Santamaria, M., Sáez, R. (2009). Análisis de la viabilidad económica y valoración de externalidades ambientales en sistemas agrarios orientados a la producción de energía: electricidad y biodiesel. Análisis del ciclo de vida de la producción de electricidad y calor con biomasa de cardo. Technical Report for Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica IFAPA (RTA2005-00150.00-00). INIA. 49 pp.

[139]. Sung KD, Lee JS, Shin CS, Park SC, Choi MJ (1999) CO<sub>2</sub> fixation by *Chlorella* sp. KR-1 and its cultural characteristics. *Bioresour Technol* 68:269–273

[140]. Jorquera, O., Kiperstok, A., Sales, E., Embirucu, M., Ghirardi, M., (2010). Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresour. Technol.* 101 (4), 1406–1413.

## BIBLIOGRAFIA

ALVAREZ COBELAS M. and ZARCO LECHADO J. (1989). Lipids in Microalgae. A review I. Biochemistry. Grasas y Aceites. Vol.40, fasc. 2: 118-145.

ANDERSEN, R. A. (2005). Algal Culturing Techniques; Elsevier Academic Press: Amsterdam, The Netherlands, (1ed).

ANDREW K. LEE, David M. LEWIS, Peter J. ASHMAN. (2010). Energy requirements and economic analysis of a full-scale microbial flocculation system for microalgae harvesting. Journal of Chemical Engineering Research and Design; 88 (8):988-996.

APT K. E. and BEHRENS P. (1999). Commercial developments in microalgal biotechnology. J. Phycol. 35: 215-226.

Aspen plus Manual, Aspen Technology Inc., 2006.

BENEMANN J.R., DUNAHAY T., ROESSLER P. and SHEEHAN J. (1998). A look back at the U.S Department of Energy's Aquatic Species Program-Biodiesel from Algae. National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, U.S.

BENEMANN J.R., WEISSMAN, J.C., KOOPMAN, B.L. and Oswald, W.J. (1977). Energy production by microbial photosynthesis. Nature, 268: 19-23.

BETZER, N., ARGAMAN, Y., KOTT, Y., (1980). Effluent treatment and algae recovery by ozone-induced flotation. Water Research; 14:1003–1009.

BLIGH EJ and DYER WJ. (1959). A rapid method of total lipid extraction and purification. Can J Biochem Physiol Pharmacol;37:911–7.

BOROWITZKA M. (2005). Culturing microalgae in outdoor ponds. In: Andersen RA, editor. Algal culturing techniques. San Diego, California: Elsevier Academic Press; p. 205–17.

BOROWITZKA, M.A. and BOROWITZKA, L.J. (1988). DUNALIELLA. In: Microalgal Biotechnology, Borowitzka, MA & Borowitzka, LJ (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 27-58.

BRENNAN L. and OWENDE P. (2010). Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. Renewable and Sustainable Energy Reviews; 14: 557-577.

CAMPBELL P. K., BEER T. and BATTEN D. (2011) Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds. Bioresour. Technol. 102 (1), 50–56.

\_\_\_\_\_ (2009) Greenhouse Gas Sequestration by Algae – energy and greenhouse gas life cycle studies, in Proc. 6th Australian Life-Cycle Assessment Conference.

CAMPOS A. J., CARMONA G. & LOPÉZ F. D., (2010). Casos URE exitosos en Colombia: Reducción de los costos energéticos en sistemas de generación de vapor. Informe Técnico, Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “francisco José de Caldas” (COLCIENCIAS), 14-26.

CARLSSON A., VAN BEILEN J., MOLLER R., CLAYTON D. (2007). Micro and macro-algae: utility for industrial applications, University of York.

CHEN Y.M., LIU J.C., JU Y.H. (1998). Flotation removal of algae from water. Colloid. Surface. 1998; 12: 49–55.

CHISTI Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Advances* 25:294–306.

CHISTI, Yusuf, MOO-YOUNG and MURRAY. (1986). Disruption of microbial cells for intracellular products. *Enzyme and Microbial Technology*. Vol. 8. p. 194-204.

CHUN-YEN Chen, KUEI-LING Yeh, RIFKA Aisyah, DUU-JONG Lee, JO-SHU Chang. (2011) Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*;102: 71-81.

CLARENS A. F., RESURRECCION E. P., WHITE M. A. and COLOSI L. M. (2010). Environmental Life-Cycle Comparison of Algae to Other Bioenergy Feedstocks, *Environmental Science and Technology* 44(5):1813–1819.

CONTRERAS F.C., PEÑA C.J., FLORES C.L. y CAÑIZARES VR., (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. Vol. 28 N° 8 *INERCIENCIA*.

COONEY M. J., YOUNG G., PATE R. (2010). Bio-oil from photosynthetic microalgae: case study. *Bioresource Technology*, doi:10.1016/j.biortech.2010.06.134.

CRANE (1988). Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. (McGRAW-HILL)..

DEL VALLE, J. M., y AGUILERA, J. M. (1999). Review: high pressure CO<sub>2</sub> extraction. Fundamentals and applications in the food industry. *Food Science and Technology International*. 1999. Vol. 5. p. 1–24.

DEMIRBAS A. (2010). Use of algae as biofuel sources. *Energy Convers Manage*, 51:2738–2749.

Directive 2009/28/EC of the European Parliament and the Council of 23 April (2009) on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, 05/06/2009, Official Journal of the European Union.

Disponibile en: [www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf](http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24190.pdf).

DIVAKARAN R, PILLAI VNS. (2002). Flocculation of algae using chitosan. *Journal of Applied Phycology*; 14(5): 419–422.

DOUGLAS J. (1988). *Conceptual Design of Chemical Processes*. McGraw-Hill International Editions, Chemical Engineering Series.

DUNSTAN GA, VOLKMAN JK, JEFFREY SW, BARRETT SM (1992) Biochemical composition of microalgae from the green algal classes Chlorophyceae and Prasinophyceae. 2. Lipid classes and fatty acids. *J Exp Mar Biol Ecol* 161:115–134.

EHIMEN E. A., SUN Z. F. and CARRINGTON C.G. (2010). Variables affecting the in situ transesterification of microalgae lipids. *Fuel*, 89:677–84.

ENGLER C.R. (1985). Disruption of Microbial Cells, in *Comprehensive Biotechnology*. Vol. 2. Oxford, England. M. Moo-Young, Editor, p. 305.

ENOHSA ente nacional de obras hídricas de saneamiento. Floculación (Cap.VII). [http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/materias/ing\\_sanitaria/ENOHSa%20Floculacion.pdf](http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/materias/ing_sanitaria/ENOHSa%20Floculacion.pdf)

FAERMAN, V., MUKMENEV, I. and SHREIBER, I. (2002). Sonication of Microalgae and its Precipitation. In: Acta Acustica united with Acustica. Vol. 88, Nº 4. p. 592-593.

FAGERSTONE K, QUINN J., MARCHESE A., BRADLEY T. (2011). Quantitative Measurement of Direct Nitrous Oxide Emissions from Microalgae Cultivation, Environmental Science & Technology, 45, 9449–9456

FAJARDO AR, CERDAN LE, MEDINA AR, FERNANDEZ FGA, MORENO PAG, GRIMA EM. (2007). Lipid extraction from the microalga *Phaeodactylum tricornutum*. Eur J Lipid Sci Technol;109:120–6.

FAO, Oil production. FAO Corp Doc Repository. [www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e0h.htm](http://www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e0h.htm)

FAVA, J. A., DENISON R., JONES B., CURRAN M. S., VIGON B., SELKE S., and BARNUM J. (1991). A technical framework for life-cycle assessments. Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). Washington, DC. Pp. 134.

FLEISCHER G. and SCHMIDT W.P. (1997). Iterative Screening LCA in an Eco-Design Tool, SETAC.

FRANK E.D., HAN J., PALOU-RIVERA I., ELGOWAINY A. and Wang M.Q. (2011). User Manual for Algae Life-Cycle Analysis with GREET: Version 0.0. Energy Systems Division, Argonne National Laboratory. <http://www.osti.gov/bridge>.

FREEDMAN B., BUTTERFIELD R., PRYDE E., MOUNTS T. (1986). Transesterification kinetics of soybean oil. *JAOCs*, 63(10),1375-1380

FREEDMAN, B., PRYDE, E., MOUNTS, T. (1984). Variables affecting the yields of fatty esters from transesterified vegetable oils. *JAOCS*, 61(10),1638-1643.

FUKUDA H, KONDO A and NODA H., (2001). Biodiesel fuel production by transesterification of oils. *J. Biosci. Bioeng.* 92: 405-416.

GARCÍA, M. GONZALO, A. SÁNCHEZ, J. ARAUZO, J. PENA, J. (2010). Prediction of normalized biodiesel properties by simulation of multiple feedstock blends, *Bioresour. Technol.* 101: 4431–4439.

GARIBA A y HERNÁNDEZ, VÁZQUEZ R-Duhalt, SÁNCHEZ S. M. del Pilar, SERRANO C. L., MARTÍNEZ J. A., (2009). Biodiesel a Partir de Microalgas. *BioTecnología*, Vol. 13 No. 3. Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México.

GARRAÍN D., HERRERA I., LAGO C., LECHÓN Y. y SÁEZ R. (2011). Análisis de ciclo de vida de biocarburantes de aceite vegetal hidrotratado. Colección Documentos CIEMAT. ISBN: 978-84-7834-663-9.

GONZÁLEZ AD, KAFAROV V and GUZMÁN A (2010). Comparison of microalgae oil extraction methods for third generation biofuel production. In: Conference Proceedings of the 19th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA: Prague, Czech Republic; August.

\_\_\_\_\_. (2009). Development of a methodology of microalgae oil extraction in the biodiesel from microalgae production chain. *Prospectiva*; 7:53–60.

GONZÁLEZ AD, AMAYA A, SARMIENTO R y KAFAROV V. (2010). Development of a methodology for microalgae oil extraction using thermal and chemical cell disruption. In: Proceedings of the XXIX Latin American Chemistry Congress – CLAQ: Cartagena, Colombia; September.

GUDIN C. and THEPENIER C. (1986). Bioconversion of solar energy into organic chemicals by microalgae. *Adv Biotechnol Process* 6:73-110.

GUSCHINA I. A. and HARWOOD L. J. (2006). Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Progress in Lipid Research*, 45:160-186.

HAARHOFF, J. (1998). Design of around-the-end hydraulic flocculators. *J Water SRT – Aqua*;47: 142–152.

HALL, D.O., H.E. MYNICK and R.H. WILLIAMS. (1991). Cooling the greenhouse with bioenergy. *Nature*, 353:11.

HANDLER R. M., CANTER C. E, KALNES T. N., LUPTON F. S., KHOLIQOV O., SHONNARD D. R., BLOWERS P. (2012). Evaluation of environmental impacts from microalgae cultivation in open-air raceway ponds: Analysis of the prior literature and investigation of wide variance in predicted impacts. *Algal Research*, Volume 1, Issue 1, Pages 83-92

HASSEBRAUCK, M. and ERMEL, G. (1996). Two examples of thermal drying of sewage sludge. *Water Sci. Technol.* 33, 235–242.

HERNÁNDEZ G. A., VÁZQUEZ-DUHALT R., M. SÁNCHEZ SAAVEDRA M, CARREÓN L. S., Jiménez M. A. (2009). Biodiesel a Partir de Microalgas. *BioTecnología*, Vol. 13 No. 3. pp 38

HERRERA, I., LECHÓN, Y., SANTAMARÍA, M., SÁEZ, R. (2009). Análisis de la viabilidad económica y valoración de externalidades ambientales en sistemas agrarios orientados a la producción de energía: electricidad y biodiesel. Análisis del ciclo de vida de la producción de electricidad y calor con biomasa de cardo. Technical Report for Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica IFAPA (RTA2005-00150.00-00). INIA. 49 pp.

HIRATA H. and MURAKOSHI M. (1977). Effects of aeration volume on the growth of marine *Chlorella* in culture. Mem. Fac. Fish., Kagoshima Univ. 26:15–21.

HIRATA H., USHIRO M. and I. HIRATA. (1982). Ecological succession of *Chlorella saccharophila*, *Brachionus plicatilis* and autogenous bacteria in culture water. Mem. Fac. Fish., Kagoshima Univ., 31:153–160.

HOUA J., ZHANGA P, YUANA X. and ZHENG Y. (2011). Life cycle assessment of biodiesel from soybean, jatropha and microalgae in China conditions. Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 5081– 5091. doi:10.1016/j.rser.2011.07.048

HU, Q., M. SOMMERFELD, E. JARVIS, M. GHIRARDI, M. POSEWITZ, M. SEIBERT, and A. Darzins. (2008). Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. Plant J. 54: 621-639.

HUNTLEY M. E. and REDALJE D. G., (2004). “CO<sub>2</sub> Mitigation and Renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal.” Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change xxx:1-36.

IDEAM. «Atlas climatológico de Colombia» (en español).

ILLMAN A. M., SCRAGG A.H., SHALES S.W. (2000). Increase in Chlorella strains calorific values when grown in low nitrogen medium. *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 2, pp. 631–635.

ISO (2006a) ISO 14040: Environmental management-life cycle assessment-principles and framework. ISO Geneva.

ISO (2006b) ISO 14044: Environmental management-life cycle assessment-requirements and guidelines. ISO Geneva.

JIANG Z.L., MENG D.W., MU H.Y. and YOSHIKAWA, K. (2010). Study on the hydrothermal drying technology of sewage sludge. *Sci. China Technol. Sci.* 53, 160–163.

JORQUERA, O., KIPERSTOK, A., Sales, E., Embirucu, M., Ghirardi, M., (2010). Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. *Bioresour. Technol.* 101 (4), 1406–1413.

KADAM, K. L (2002). Environmental implications of power generation via coal-microalgae cofiring. *Energy*, 27 (10), 905–22.

\_\_\_\_\_ (2001). Microalgae Production from Power Plant Flue Gas: Environmental Implications on a Life-Cycle Basis, National Renewable Energy Laboratory.

KAY R. A. (1991). Microalgae as food and supplement. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 30:555–73.

KHOO HH, SHARRATT PN, DAS P, BALASUBRAMANIAN RK, NARAHARISETTI PK and SHAIK S. (2011). Life cycle energy and CO<sub>2</sub> analysis of microalgae-to-biodiesel: Preliminary results and comparisons *Bioresour Technol*;102:5800-07.

KING, J. W. (2000). Advances in critical fluid technology for food processing. *Food Science and Technology Today*. Vol. 14. p. 186–191.

KNUCKEY, R.M., BROWN, M.R., ROBERT, R., FRAMPTON, D.M.F. (2006). Production of microalgal concentrates by flocculation and their assessment as aquaculture feeds. *Aquacultural Engineering*; 35: 300–313.

KOJIMA, H. and LEE Y- K. (2001). Photosynthetic microorganisms in Environmental Biotechnology. Springer-Verlag. Hong-Kong. 310p.

KOREVAAR G. (2000). Sustainability in process design methodology. In proceedings 21st annual European AIChE. Hague.

LARDON L., HELIAS A., SIALVE B., STAYER J. P. and BERNARD O. (2009). Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae, *Environmental Science and Technology* 43(17):6475–6481.

LECHÓN Y, CABAL H, RÚA C, LAGO C, IZQUIERDO L, SÁEZ R. M. y SAN MIGUEL M. (2006). “Análisis de Ciclo de Vida de Combustibles Alternativos para el Transporte. Fase II. Análisis de Ciclo de Vida Comparativo de Biodiesel y Diésel”. CIEMAT/ASE/05-E0221/2.

LI Y., HORSMAN M., WU, N., LAN, C., and DUBOIS-CALERO, N. (2008). Biofuels from microalgae. *Biotechnol Prog*, 24, 815-820.

LI, Y., MARKLEY, B., MOHAN, A.R., RODRIGUEZ-SANTIAGO, V., THOMPSON, D., NIEKERK, D.V. (2006). Utilization of carbon dioxide from Coal-fired power plant for the Production of value-added products, Design Engineering of Energy and Geo-Environmental Systems Course (EGEE 580).

MA F and HANNA MA., (1999). Biodiesel production: a review. *Bioresour Technol.* 70: 1-15.

MACEDO, I.D.C. (1999). Energy from biomass and wastes. *Biomass Bioenergy*, 3: 77-80.

MARCHETTI J.M and ERRAZU A.F. (2008). Esterification of free fatty acids using sulfuric acid as catalyst in the presence of triglycerides, *Biomass Bioenergy* 32 892–895.

MARCHETTI, J.M. (2008). Esterification of free fatty acids using sulfuric acid as catalyst in the presence of triglycerides, *Biomass Bioenergy*, 32, 892–895.

MATA T. M., MARTINS A. A. and CAETANO N.S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renew Sustain Energy Rev*; 14:217-32.

MCKENDRY P. (2003). Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. *Biores Technol*; 83:47–54.

MEHER L. C, SAGAR D. V. and NAIK S.N. (2006). Technical aspects of biodiesel production by transesterification-a review. *Renew Sustain Energy Rev* 10:248-268

MIAO X. and WU, Q. (2006). Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. *Bioresource Technology*, Volume 97, Issue 6.pp 841-846.

MICHAEL B., ZHIYOU Wen and VIRGINIA Johnson. (2009). Microalgae as a Feedstock for Biofuel Production. Biological Systems Engineering, Virginia Tech.

MOHN FH,. (1980). Experiences and strategies in the recovery of biomass in mass culture of microalgae. In: Shelef G, Soeder CJ, editors. Algal biomass. Amsterdam: Elsevier; 547–571.

MOLINA GRIMA, E., BELARBI E. H., ACIEN FERNANDEZ F. G., Robles Medina A. and CHISTI Y. (2003). Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. Biotechnol. Adv, 20, 491–515.

MOLINA GRIMA, E., F. ACIEN FERNANDEZ, F. GARCIA CAMACHO, and Y. CHISTI., (1999). Photobioreactors: Light regime, mass transfer, and scale up. Journal of Biotechnology 70:231–47.

MOLLAH, M.Y.A., MORKOVSKY, P., GOMES, J.A.G., KESMEZ, M., PARGA, J., COCKE, D.L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. J. Hazard. Mater; 114:199–210.

MUÑOZ R, GUIEYSSE B,. (2006). Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. Water Research; 40 (15) :2799–2815.

MYINT L. L. and EL-HALWAGI M. M. (2009). Process analysis and optimization of biodiesel production from soybean oil. J Clean Tech Environ Policy 11:263-276. doi: 10.1007/s10098-008-0156-5

OGBONNA J.C. and TANAKA, H. (1996). Night Biomass Loss and Changes in Biochemical Composition of Cells during Light/Dark Cyclic Culture of *Chlorella pyrenoidosa* J. Ferment. Bioeng. 6: 558-564.

OLGUIN E., (1984). Microalgae biomass as source of chemicals, fuels, and proteins. In sixth Australian Biotechnology Conference. University of Queensland, St. Lucia Brisbane.

PANT D., OLSEN S.I. and NIGAM P.S. (2012). Key issues to consider in microalgae based biodiesel production. Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research. Volume (issues) **29(1)**: 687-700

PAPAZI A., MAKRIDIS P., DIVANACH P. and KOTZABASIS K. (2008). Bioenergetic changes in the microalgal photosynthetic apparatus by extremely high CO<sub>2</sub> concentrations induce an intense biomass production. *Physiol Plant*. 132: 338-49.

PARDO Y., SANCHEZ E. and KAFAROV V. (2010). Life Cycle Assessment of Third Generation Biofuels Production. *Chemical Engineering Transactions* ISSN: 1974-9791. Editorial AIDIC v.21 fasc.N/A p.1177 - 1182.

PERALTA-RUIZ Y, GONZÁLEZ-DELGADO A.-D., KAFAROV V. (2012). Evaluation of alternatives for microalgae oil extraction based on exergy analysis. *Applied Energy*, Volume 101, January 2013, Pages 226-236

PERALTA-RUIZ Y, PARDO Y., CANCHILA ROMERO H. D., KAFAROV V. (2012). Implementación de la metodología de síntesis y análisis de procesos a la etapa de cosecha de microalgas para la producción de biodiesel. *Prospect*. Vol. 10, No. 1, págs. 132-144

PETERS, M., TIMMERHAUS, K. and WEST, R., (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill, New York.

PETKOV G. and GARCIA G. (2007). Which are fatty acids of the green alga *Chlorella*?. *Biochem Syst Ecol*, 35: 281-285.

PHILIP T P. and AI DARZINS. (2009). The promise and challenges of microalgal-derived biofuels. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA. Wiley InterScience, DOI: 10.1002/bbb.159; *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 3:431–440.

PHUKAN M. M. CHUTIA R. S. KONWAR B. K. and KATAKI R. (2011). Microalgae *Chlorella* as a potential bioenergy feedstock. *Appl Energ*, 88:3307-12.

PHUKAN MM, CHUTIA RS, KONWAR BK, KATAKI R. (2010). Microalgae *Chlorella* as a potential bio-energy feedstock. *Applied Energy* in press. doi:10.1016/j.apenergy.11.026.

POKOO-AIKINS G., AHMED NADIM., MAHMOUD M. and EL-HALWAGI V. (2009). Design and analysis of biodiesel production from algae grown through carbon sequestration. *Clean Techn Environ Policy*, 12:239-254.

PRé “SimaPro®7.1”, PRé Consultants (2007). Amersfoort, The Netherlands (<http://www.pre.nl>).

RAZON, L. F., & TAN, R. R. (2011). Net energy analysis of the production of biodiesel and biogas from the microalgae: *Haematococcuspluvialis* and *Nannochloropsis*. *Applied Energy*, 88(10), 3507-3514.

RICHMOND, Amos. (2004). *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology*. Wiley-Blackwell Publishing. 577p.

SALAZAR GONZÁLEZ, M. (2006). Aplicación e importancia de las microalgas en el tratamiento de aguas residuales. *Contactos* 59: 64-70.

SÁNCHEZ E., OJEDA K., EL-HALWAGI M. and KAFAROV V. (2011). Biodiesel from microalgae oil production in two sequential esterification/transesterification reactors: Pinch analysis of heat integration. *Chem Eng J*, 176:211-6.

SANCHÉZ E. (2011). Desarrollo de un proceso para el aprovechamiento integral de microalgas para la obtención de biocombustibles. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanaga.

SANDER K. and MURTHY G. S. (2010). Life cycle analysis of algae biodiesel. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1-11.

SHARMA YC, SINGH B and UPADHYAY SN. (2008). Advancements in development and characterization of biodiesel: a review. *Fuel*. 87: 2355-2373.

SHEEHAN, J.; DUNAHAY, T., BENEMANN J., ROESSLER P. (1998). A look back at the US Department of Energy's Aquatic Species Program-Biodiesel from Algae. National Renewable Energy Laboratory, [www.nrel.gov/docs/fy04osti/34796.pdf](http://www.nrel.gov/docs/fy04osti/34796.pdf).

SOLOMON, S., QIN D., MANNING ., M., CHEN Z., MARQUIS M., AVERYT K.B., TIGNOR M. and Miller H.L. (2007). Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html)

SPOLAORE, P., JOANNIS-CASSAN, C., DURAN, E. and ISAMBERT, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *J. of Bioscience and Bioengineering*. Vol 101. 87- 96.

STEPHENSON A. L., KAZAMIA E., DENNIS J. S., HOWE C. J., SCOTT S. A. and SMITH, A. G. (2010). Life-Cycle Assessment of Potential Algal Biodiesel Production in the United Kingdom: A Comparison of Raceways and Air-Lift Tubular Bioreactors,. *Energy and Fuels* 24(7):4062–4077.

SUNG KD, LEE JS, SHIN CS, PARK SC, CHOI MJ (1999) CO<sub>2</sub> fixation by *Chlorella* sp. KR-1 and its cultural characteristics. *Bioresour Technol* 68:269–273

TAPASVI D, WIESENBORN D. and GUSTAFSON C. (2005). Process model for biodiesel production from various feedstocks. *Am Soc Agric Eng* 48:2215-2221.

TORRENTERA B.L. (1983). Cultivo semicontinuo de *Chlorella saccharophila* Kruger. Tesis. Esc. Nal. est. Prof. iztacala, UNAM, pp. 68. México, D.F.

TRAVIESO L. and BENITEZ ECHEGOYEN F, (1998). Cultivo de *Arthrospira* sp: del Laboratorio a Planta Piloto. Curso: Tecnología y aprovechamiento del cultivo heterotrófico de microalgas. Centro de Investigaciones Pesqueras. La Habana. Cuba.

TSUKAHARA K and SAWAYAMA S. (2005). Liquid fuel production using microalgae. *J Jpn Petrol, Inst*; 48(5):251–9

TURTON R., BAILIE R., WHITING W. and SHAEIWITZ J. (1998). Analysis Synthesis, and Design of Chemical Processes. Prentice Hall.

UGWU CU, AOYAGI H, UCHIYAMA H. 2008. Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology* 99: 4021-4028

United Nation Environmental Program (UNEP) (1998). Evaluation of environmental impacts in life cycle assessment. Meeting report. Brussels.

VAN GEMERT G.W., (2009). The Delta dryer Theoretical and Technological Development of An Energy-efficient Dryer for Sludge. Diss. Delft University of Technology, Delft.

VERVERIS C., GEORGHIOU K., DANIELIDIS D., HATZINIKOLAOU D. G., SANTAS P., SANTAS R., and CORLETI, V. (2007). Cellulose–hemicellulose, lignin and ash content of some organic materials and their suitability for use as paper supplements. *Bioresour Technol*, 98:296–301.

VESSIA Oyvind. (2007). Planning of sustainable energy distribution systems Part III: A Life Cycle Assessment Perspective. In: SINTEF Energy Research. 104p. ISBN N° 978-82-594-3294-0.

VIEIRA C. (2004). Producción de biodiesel a partir de microalgas. 1er Congreso Latinoamericano sobre Biotecnología Algal. Argentina. ISBN N° 987- 1130-32-5.

WARD O. P., SINGH A (2005). Omega–3/6 fatty acids: Alternative sources of production. *Process Biochemistry*. Vol. 40, Issue 12. p. 3627-3652.

WU T and MAO L. (2008). Influences of hot air drying and microwave drying on nutritional and odorous properties of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets. *Food Chemistry*, 110, Issue 3, 1, 647-653.

XU Han, MIAO Xiaoling and WU Qingyu. (2006). High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. *Journal of Biotechnology* 126, 499–507.

YANG J, Xu M, Zhang X, Hu Q, Sommerfeld M, Chen Y. (2010). Life-cycle analysis on biodiesel production from microalgae: Water footprint and nutrients balance. *Bioresour Technol* 102(1):159-65. doi:10.1016/j.biortech.2010.07.017

ZHANG Y, DUBÉ MA, MCLEAN D. D. and KATES M. (2003b). Biodiesel Production from Waste Cooking Oil: 2. Economic Assessment and Sensitivity Analysis. *Bioresource Technol* 90(3):229-240

## ANEXOS

### ANEXO A. Rueda de paletas (paddlewheel) en sistema de cultivo abierto.



## ANEXO B. Normativas de la Unión Europea y Estándares Americanos para el biodiesel producido

Propiedad	Unidad	Límites		Método	
		ASTM D6751	EN14214	ASTM D6751	EN 14214
Flash point	°C	130.0 min.	101.0 min.	D93	ISO CD3679e
Kinematic viscosity @ 40°C	mm <sup>2</sup> /s	1.9–6.0	3.5–5.0	D445	EN ISO 3104
Cetane number	-	47 min.	51 min.	D613	EN ISO 5165
Sulfated ash content	% (m/m)	0.020 max.		D874	ISO 2987
Copper-strip corrosion	-	No. 3 max.	Class 1	D130	EN ISO 2160
Acid value	mg KOH/g	0.80 max.	0.5 max.	D664	pr EN 14104
Free glycerol	% (m/m)	0.020 max.		D6584	pr EN 14105m pr EN 14106
Total glycerol	% (m/m)	0.240 max.	0.25 max.	D6584	pr EN 14105m
Phosphorus content	% (m/m)	0.001 max.	0.01 max.	D4951	pr EN 141101
<i>Carbon residue</i>					
ASTM D6751 (100% sample)	% (m/m)	0.050 max.	-	D4530	-
EN 14214 (10% bottoms)		-	0.3 max.	-	EN ISO 10370
Cloud point	°C	Report customer	-	D2500	-
Density @ 15°C	kg/m <sup>3</sup>	-	860-900	-	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Distillation T90 AET	°C	360 max.	-	D1160	-
Sulfur (S 15 grade)	ppm	0.0015 max.	-	D5453	-
Sulfur (S 500 grade)	ppm	0.05 max.	-	D5453	-
Sulfur content	mg/kg	-	10 max.	-	-
Water and sediment	% vol.	0.050 max.	-	D2709	-
Water content	mg/kg	-	500 max.	-	EN ISO 12937
Total contamination	mg/kg	-	24 max.	-	EN 12662
Oxidation stability @ 110°C	h	-	6 min.	-	pr EN 14112
Iodine value	-	-	120 max.	-	pr EN 14111
Linolenic acid methyl ester	% (m/m)	-	12 max.	-	pr EN 14103d
Polyunsaturated (4 double bonds) methyl esters	% (m/m)	-	1 max.	-	pr EN 14103
Ester content	% (m/m)	-	96.5 min.	-	pr EN 14103d
Methanol content	% (m/m)	-	0.2 max.	-	pr EN 14101
Monoglycerides content	% (m/m)	-	0.8 max.	-	pr EN 14105m
Diglycerides content	% (m/m)	-	0.2 max.	-	pr EN 14105m
Triglycerides content	% (m/m)	-	0.2 max.	-	pr EN 14105m
Alkaline metals (Na+K)	mg/kg	-	5 max.	-	pr EN 14108 pr EN 14109

## ANEXO C. Escenario creado en SimaPro de producción de energía térmica en Colombia.

NexusDB@192.168.1.1:Default(Profesional): Production of biodiesel from microalgae - [Editar energía proceso 'Heat natural gas, from water/CO U']

Archivo Editar Calcular Herramientas Ventana Ayuda

Documentación Entrada/salida Parámetros Descripción del sistema

Productos							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos							
Nombre	Cantidad	Unidad	Cantidad	Pct.	Categoría	Comentario	
Heat natural gas, from water/CO U	1	MJ	Energy	100 %	Heat/Gas		
(Insertar línea aquí)							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados							
Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMin.	Máx.	Comentario	
(Insertar línea aquí)							
Entradas							
Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMin.	Máx.	Comentario
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)							
Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMin.	Máx.	Comentario	
Natural gas CO (m3)	0,025641026	m3	Indefinido				
Water, decarbonised, at plant/RER U	0,00728633	ton	Indefinido				
(Insertar línea aquí)							
Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)							
Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMin.	Máx.	Comentario	
(Insertar línea aquí)							
Salidas							
Emisiones al aire							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMin.	Máx.	Comentario
Particulates, < 10 um		3,9232E-12	kg	Indefinido			
Nitrogen oxides		1,29382E-10	kg	Indefinido			
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin		3,96494E-12	kg	Indefinido			
Sulfur oxides		3,13021E-11	kg	Indefinido			
Carbon monoxide		2,50417E-11	kg	Indefinido			
Carbon dioxide, fossil		4,92487E-8	kg	Indefinido			
Methane		1,46077E-12	kg	Indefinido			
(Insertar línea aquí)							
Emisiones al agua							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMin.	Máx.	Comentario
Solved solids		1,9616E-11	kg	Indefinido			
Suspended solids, unspecified		2,08681E-11	kg	Indefinido			
BOD5, Biological Oxygen Demand		1,16861E-13	kg	Indefinido			
COD, Chemical Oxygen Demand		1,00167E-11	kg	Indefinido			
Ammonia		2,25375E-14	kg	Indefinido			
(Insertar línea aquí)							
Emisiones al suelo							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMin.	Máx.	Comentario
(Insertar línea aquí)							
Flujos finales de residuos							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMin.	Máx.	Comentario
(Insertar línea aquí)							
Emisiones no materiales							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMin.	Máx.	Comentario
(Insertar línea aquí)							
Aspectos sociales							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMin.	Máx.	Comentario
(Insertar línea aquí)							
Asuntos economicos							
Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMin.	Máx.	Comentario
(Insertar línea aquí)							
Salidas conocidas a la tecnósfera. Residuos y emisiones para tratamiento							
Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2^*DSMin.	Máx.	Comentario	
(Insertar línea aquí)							

Universidad Industrial 001

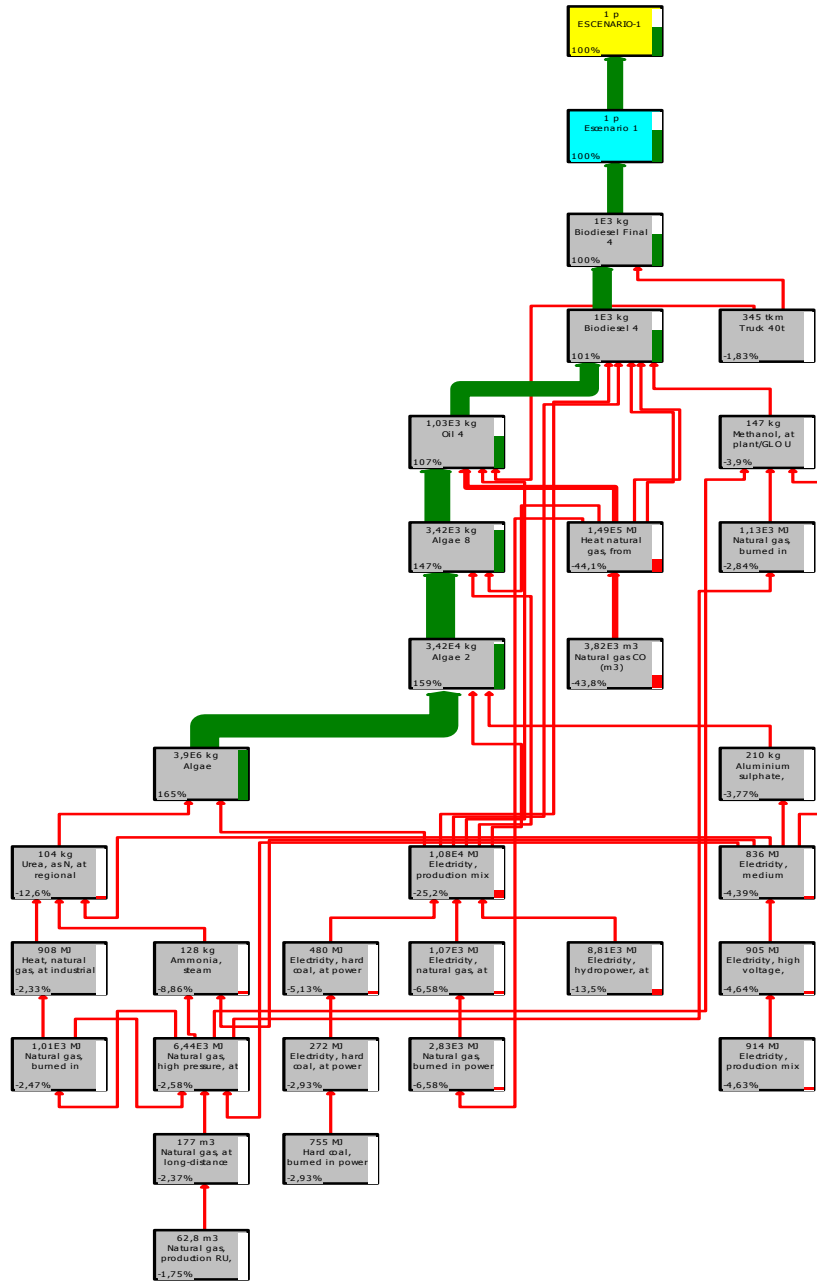
## ANEXO D. Escenario creado en SimaPro de producción de energía eléctrica en Colombia.

The screenshot displays the SimaPro software interface for the scenario 'Electricity, production mix CO/CO U'. The main window is titled 'Productos' and contains several data tables:

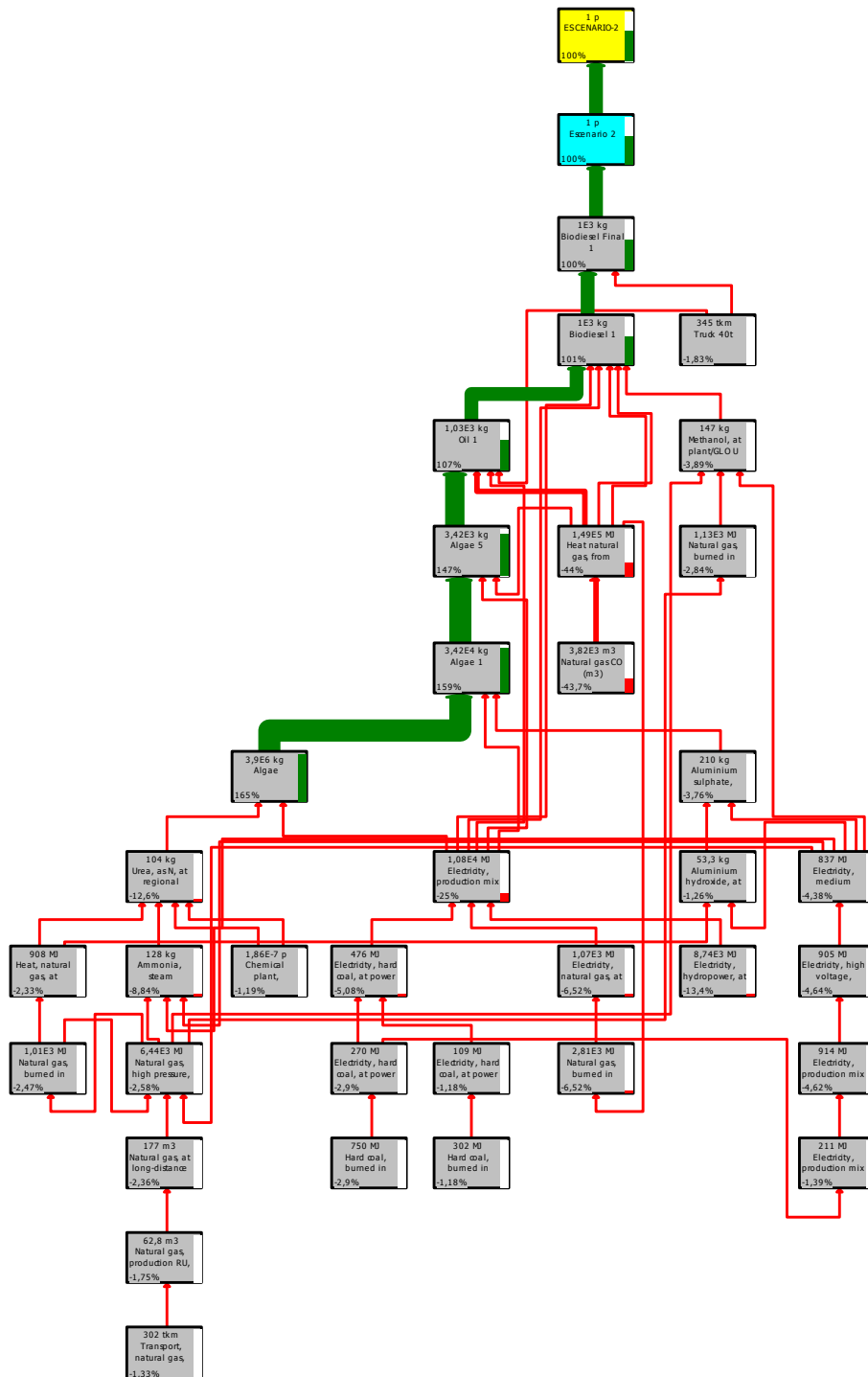
- Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos:** A table with columns for Nombre, Cantidad, Unidad, Cantidad, Pct., Categoría, and Comentario. One entry is visible: 'Electricity, production mix CO/CO U' with a quantity of 1 kWh and 100%.
- Salidas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados:** A table with columns for Nombre, Cantidad, Unidad, Distribución, DS^2 or 2^\*DSMín., Máx., and Comentario.
- Entradas:** A section containing three sub-tables:
  - Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos):** A table with columns for Nombre, Subcompartimento, Cantidad, Unidad, Distribución, DS^2 or 2^\*DSMín., Máx., and Comentario.
  - Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles):** A table with columns for Nombre, Cantidad, Unidad, Distribución, DS^2 or 2^\*DSMín., Máx., and Comentario. It lists inputs like 'Electricity, hard coal, at power plant/UCTE U' and 'Electricity, natural gas, at power plant/UCTE CO U'.
  - Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor):** A table with columns for Nombre, Cantidad, Unidad, Distribución, DS^2 or 2^\*DSMín., Máx., and Comentario.
- Salidas:** A section containing three sub-tables for emissions:
  - Emisiones al aire:** A table with columns for Nombre, Subcompartimento, Cantidad, Unidad, Distribución, DS^2 or 2^\*DSMín., Máx., and Comentario.
  - Emisiones al agua:** A table with columns for Nombre, Subcompartimento, Cantidad, Unidad, Distribución, DS^2 or 2^\*DSMín., Máx., and Comentario.
  - Emisiones al suelo:** A table with columns for Nombre, Subcompartimento, Cantidad, Unidad, Distribución, DS^2 or 2^\*DSMín., Máx., and Comentario.

The bottom of the window shows the system tray with the date and time: 02:34 p.m., 12/08/2013.

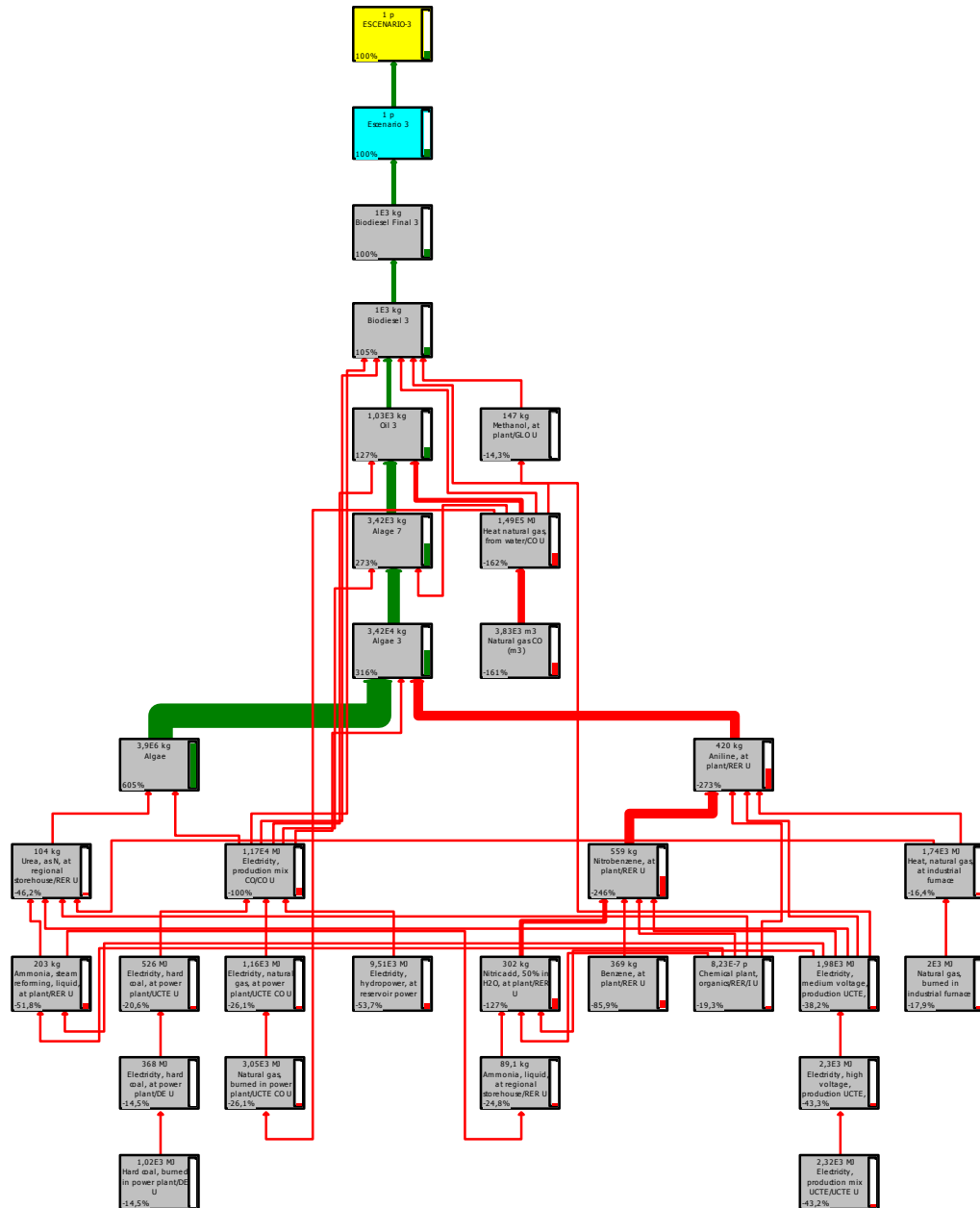
**ANEXO E. Red de Ciclo de Vida para el escenario 1 tomado directamente desde SimaPro para la categoría PCG (Global warming (GWP100) (kg CO2 eq)).**



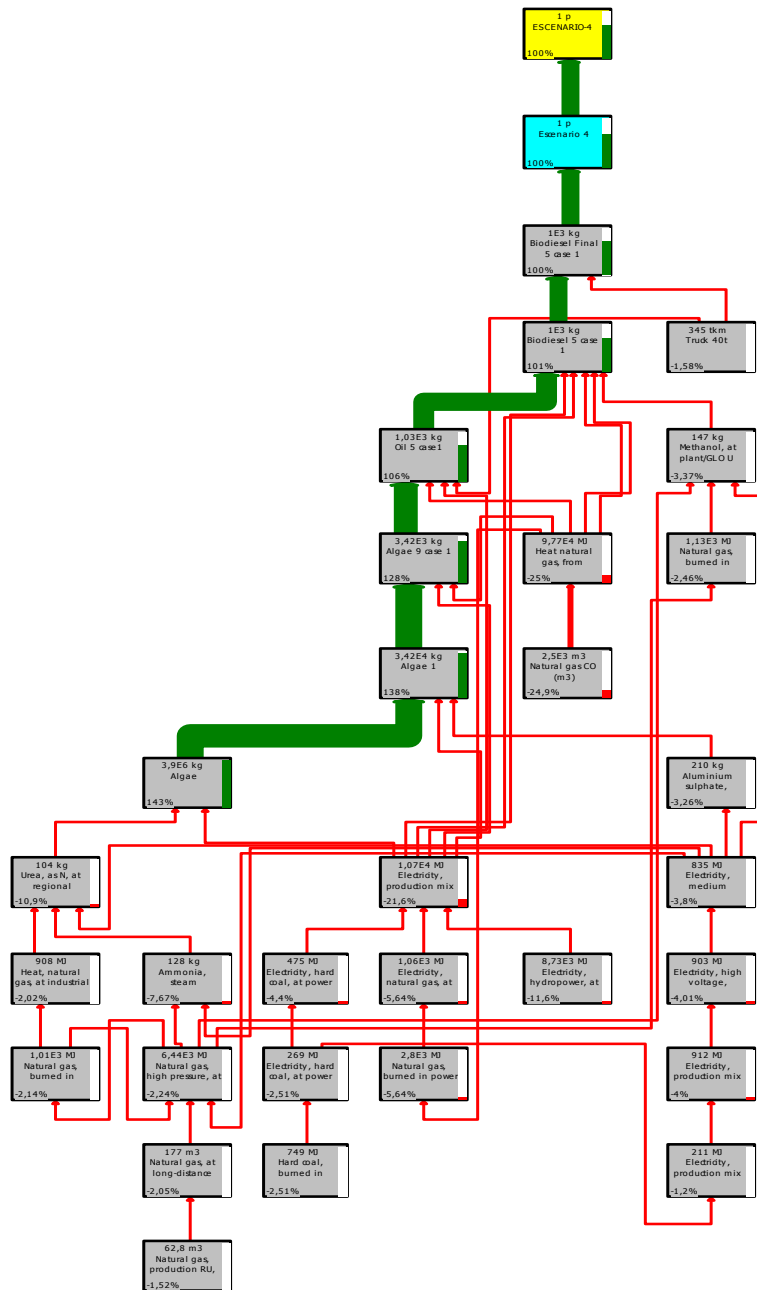
**ANEXO F. Red de Ciclo de Vida para el escenario 2 tomado directamente desde SimaPro para la categoría PCG (Global warming (GWP100) (kg CO2 eq)).**



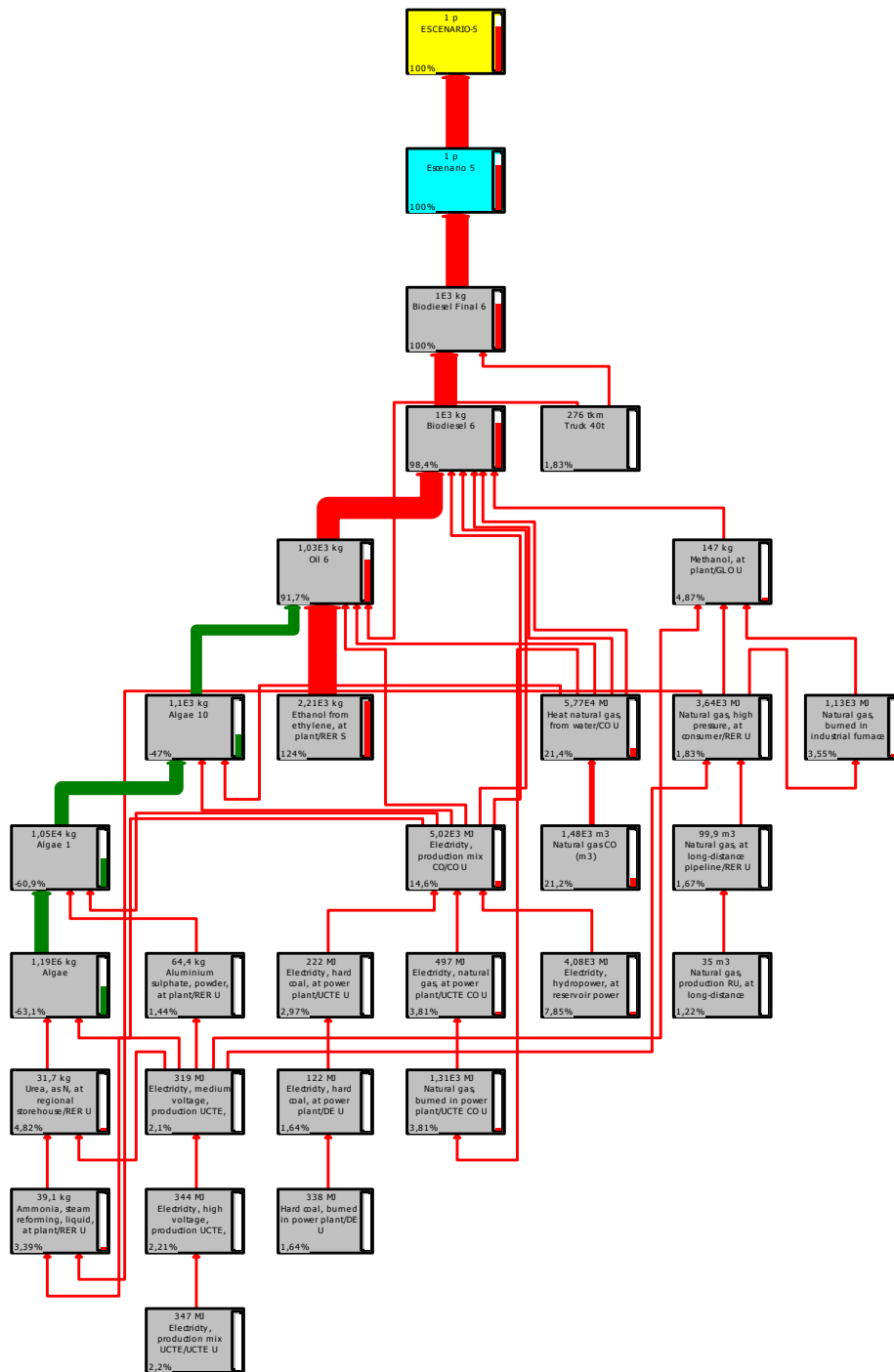
**ANEXO G. Red de Ciclo de Vida para el escenario 3 tomado directamente desde SimaPro para la categoría PCG (Global warming (GWP100) (kg CO2 eq)).**



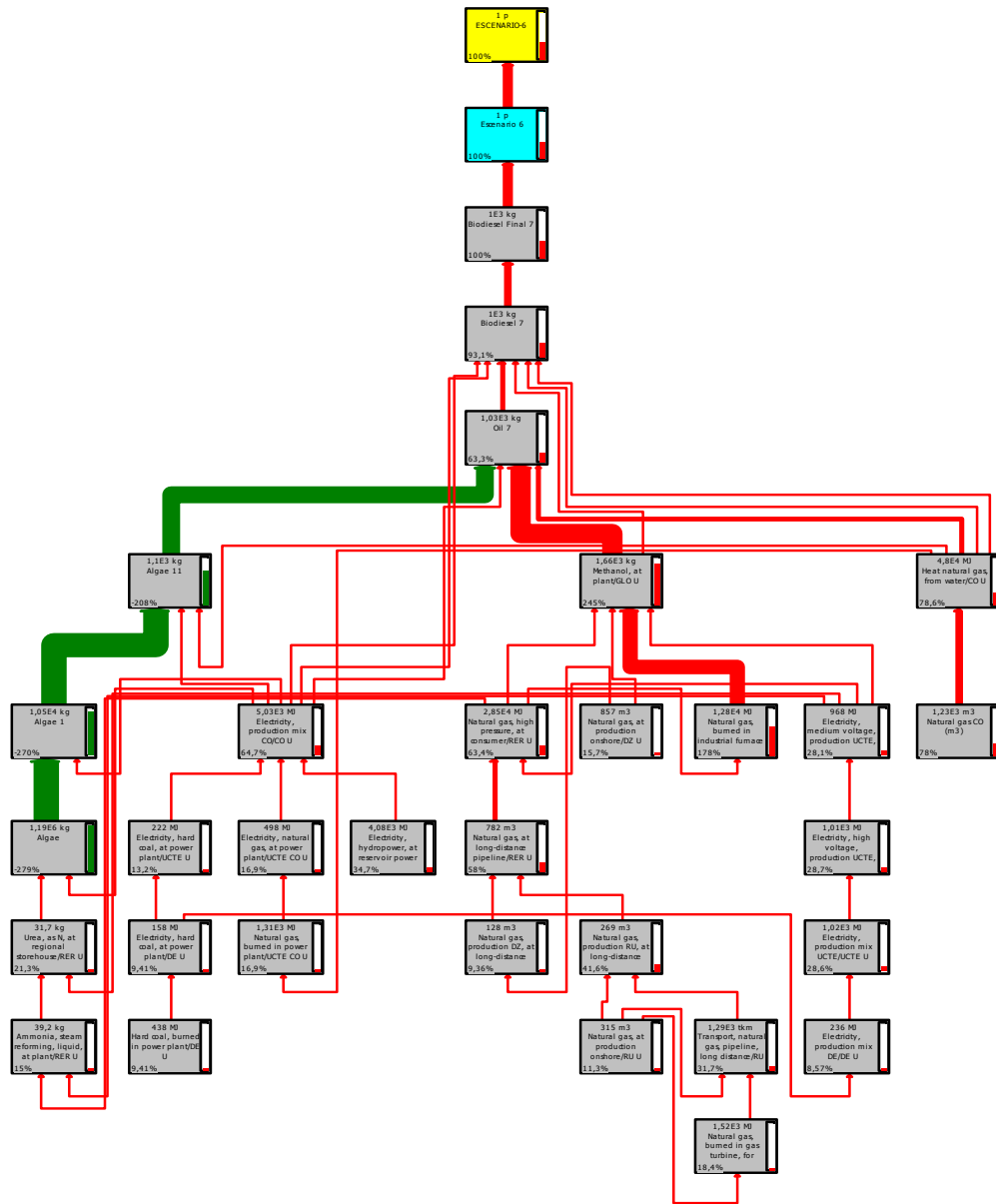
**ANEXO H. Red de Ciclo de Vida para el escenario 4 tomado directamente desde SimaPro para la categoría PCG (Global warming (GWP100) (kg CO<sub>2</sub> eq)).**



**ANEXO I. Red de Ciclo de Vida para el escenario 5 tomado directamente desde SimaPro para la categoría PCG (Global warming (GWP100) (kg CO2 eq)).**



**ANEXO J. Red de Ciclo de Vida para el escenario 6 tomado directamente desde SimaPro para la categoría PCG (Global warming (GWP100) (kg CO<sub>2</sub> eq)).**



## ANEXO K. Escenario creado en SimaPro de producción de calor a partir de biomasa.

Productos

Saldas conocidas a la tecnósfera. Productos y co-productos

Nombre	Cantidad	Unidad	Cantidad	Pct.	Categoría	Comentario
Heat from biomass/ CO U	1	MJ	Energy	100 %	HeatWood	

(Insertar línea aquí)

Saldas conocidas a la tecnósfera. Productos evitados

Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2*DSMin.	Máx.	Comentario
(Insertar línea aquí)						

Entradas

Entradas conocidas desde la naturaleza (recursos)

Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2*DSMin.	Máx.	Comentario
(Insertar línea aquí)							

Entradas conocidas desde la tecnósfera (materiales/combustibles)

Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2*DSMin.	Máx.	Comentario
Truck 28t ETH U	0,005702	tkm	Indefnido			100km

(Insertar línea aquí)

Entradas conocidas desde la tecnósfera (electricidad/calor)

Nombre	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2*DSMin.	Máx.	Comentario
(Insertar línea aquí)						

Salidas

Emissiones al aire

Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2*DSMin.	Máx.	Comentario
Carbon dioxide, fossil		0,176923077	g	Indefnido			
Carbon monoxide, fossil		0,680473373	g	Indefnido			
Nitrogen oxides		0,115384615	g	Indefnido			
Sulfur oxides		0,023905325	g	Indefnido			
Dinitrogen monoxide		0,668639053	mg	Indefnido			
Particulates, < 2.5 um		0,000134	kg	Indefnido			
Particulates, < 10 um		0,000155	kg	Indefnido			

(Insertar línea aquí)

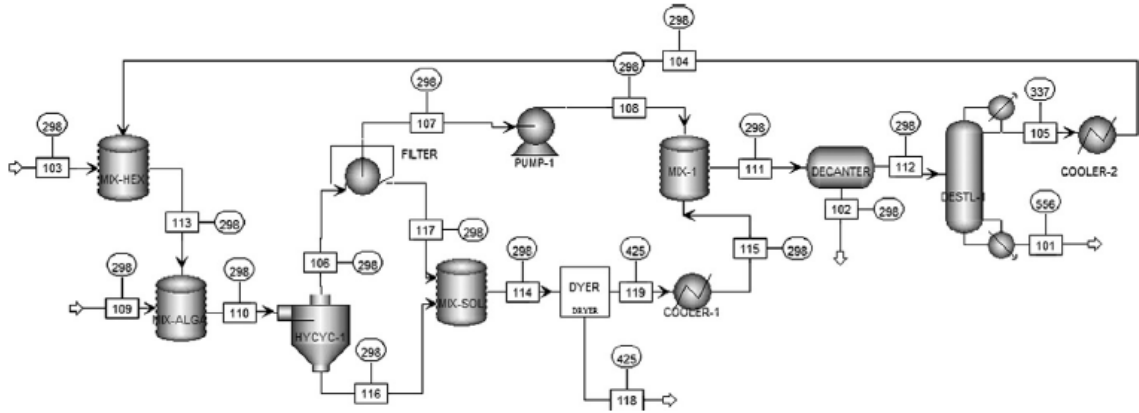
Emissiones al agua

Nombre	Subcompartimento	Cantidad	Unidad	Distribución	DS^2 or 2*DSMin.	Máx.	Comentario
(Insertar línea aquí)							

Emissiones al suelo

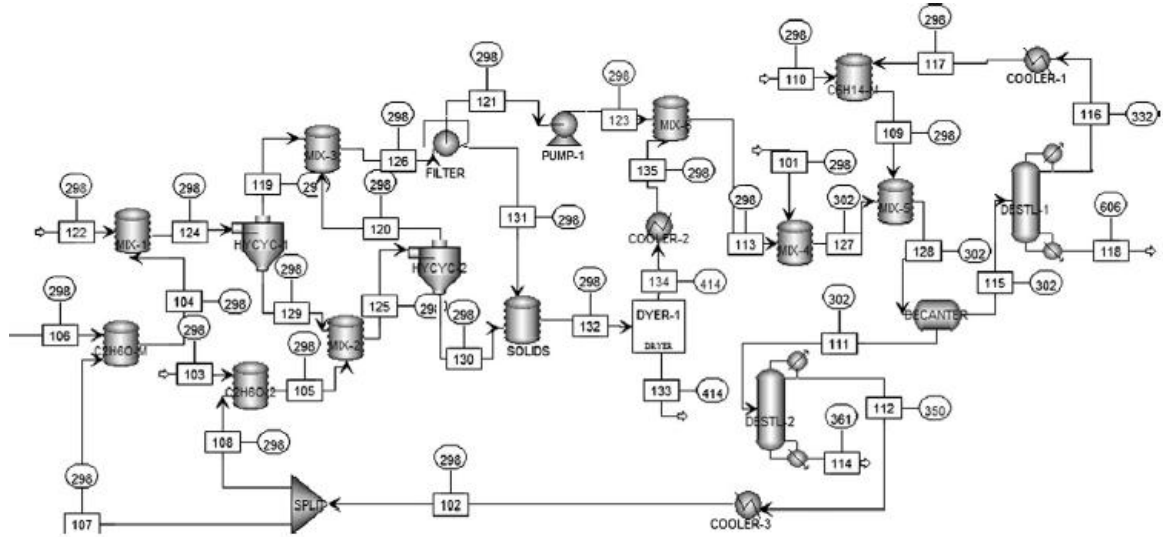
Universidad Industrial 001

## ANEXO L. Principales corrientes del proceso de extracción de aceite EH.



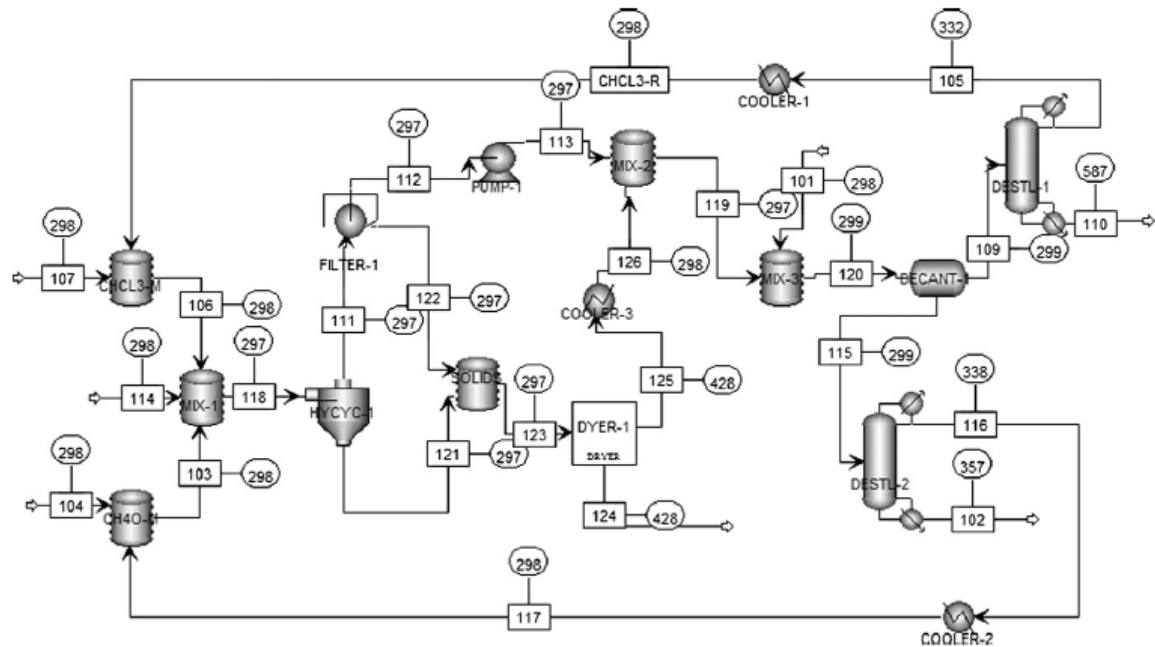
Streams	101	106	109	111	112	114	116	117	118
Pressure (kPa)	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	70.927	101.325	70.927	101.325
Temperature (K)	554.8	298	298	298	298	298	298	298	433
Mass flow (kg/h)	12236.44	726857	36669	746488.20	745839	44461.65	43451.43	1010.22	23820.18
<i>Component (mole fraction)</i>									
Cellulose	0	0	0.06	0	0	0.04	0.04	0.05	0.08
Lignin	0	0	0.01	0	0	0.01	0.01	0.01	0.02
Hemicellulose	0	0	0.17	0	0	0.1	0.1	0.14	0.21
Aspartic	0	0	0.05	0	0	0.03	0.03	0.04	0.06
Glutamic	0	0	0.05	0	0	0.03	0.03	0.04	0.06
Glycine	0	0	0.1	0	0	0.06	0.06	0.08	0.13
Alanine	0	0	0.1	0	0	0.06	0.06	0.08	0.13
Valine	0	0	0.05	0	0	0.03	0.03	0.04	0.07
Leucine	0	0	0.05	0	0	0.03	0.03	0.04	0.06
Proline	0	0	0.07	0	0	0.04	0.04	0.06	0.09
Lysine	0	0	0.08	0	0	0.04	0.04	0.06	0.1
C14H2-01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
C16H3-01	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0
C16H3-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C16H3-03	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
C16H3-04	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
C18H3-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C18H3-02	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
C18H3-03	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
C18H3-04	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
TGC14-01	0.09	0	0.01	0	0	0	0	0	0
TGC16-01	0.21	0	0.01	0	0	0	0	0	0
TGC16-02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
TGC16-03	0.09	0	0.01	0	0	0	0	0	0
TGC16-04	0.08	0	0.01	0	0	0	0	0	0
TGC18-01	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
TGC18-02	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0
TGC18-03	0.16	0	0.01	0	0	0	0	0	0
TGC18-04	0.15	0	0.01	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0.01	0.14	0.01	0	0	0	0	0
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.03	0.99	0	0.99	1	0.52	0.53	0.37	0

## ANEXO M. Principales corrientes del proceso de extracción de aceite EEH.



Streams	115	118	119	122	124	125	128	129	130	132
Pressure (kPa)	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	51.67
Temperature (K)	302	604.6	297.7	298	297.7	297.9	302.2	297.7	297.9	297.9
Mass flow (kg/h)	653366.7	12212.38	177640.3	36662	210744.3	128752.5	1286204	33104.07	28405.48	31675.21
<i>Component (mole fraction)</i>										
Cellulose	0	0	0	0.06	0	0.01	0	0.04	0.03	0.04
Lignin	0	0	0	0.01	0	0	0	0.01	0.01	0.01
Hemicellulose	0	0	0	0.17	0.01	0.02	0	0.1	0.09	0.11
Aspartic	0	0	0	0.05	0	0	0	0.03	0.02	0.03
Glutamic	0	0	0	0.05	0	0	0	0.03	0.03	0.03
Glycine	0	0	0	0.1	0.01	0.01	0	0.06	0.05	0.07
Alanine	0	0	0	0.1	0.01	0.01	0	0.06	0.05	0.07
Valine	0	0	0	0.05	0	0	0	0.03	0.03	0.04
Leucine	0	0	0	0.05	0	0	0	0.03	0.03	0.03
Proline	0	0	0	0.07	0	0.01	0	0.04	0.04	0.05
Lysine	0	0	0	0.08	0	0.01	0	0.04	0.04	0.05
C14H2-01	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
C16H3-01	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0
C16H3-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C16H3-03	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
C16H3-04	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
C18H3-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C18H3-02	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
C18H3-03	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
C18H3-04	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
TGC14-01	0	0.09	0	0.01	0	0	0	0	0	0
TGC16-01	0	0.22	0	0.01	0	0	0	0	0	0
TGC16-02	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0
TGC16-03	0	0.09	0	0.01	0	0	0	0	0	0
TGC16-04	0	0.08	0	0.01	0	0	0	0	0	0
TGC18-01	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0
TGC18-02	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0
TGC18-03	0	0.16	0	0.01	0	0	0	0	0	0
TGC18-04	0	0.15	0	0.01	0	0	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	0.15	0.14	0.14	0.12	0.62	0.08	0.08	0.06
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.97	0.01	0	0	0	0	0.21	0	0	0
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	0.03	0	0.84	0	0.81	0.8	0.17	0.45	0.5	0.4

## ANEXO N. Principales corrientes del proceso de extracción de aceite EMC.



	109	110	111	113	114	118	120	123	124
Pressure (kPa)	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	101.325	51.67	101.325
Temperature (K)	299	586.8	296.6	296.6	298	296.6	299.1	296.6	427.7
Mass flow (kg/h)	447383.7	12212.6	651982.8	651298.4	36687	691686.7	810963.3	40388.27	23831.88
<i>Component (mole fraction)</i>									
Cellulose	0	0	0	0	0.06	0	0	0.03	0.08
Lignin	0	0	0	0	0.01	0	0	0.01	0.02
Hemicellulose	0	0	0	0	0.17	0	0	0.1	0.21
Aspartic	0	0	0	0	0.05	0	0	0.03	0.06
Glutamic	0	0	0	0	0.05	0	0	0.03	0.06
Glycine	0	0	0	0	0.1	0	0	0.06	0.13
Alanine	0	0	0	0	0.1	0	0	0.06	0.13
Valine	0	0	0	0	0.05	0	0	0.03	0.07
Leucine	0	0	0	0	0.05	0	0	0.03	0.06
Proline	0	0	0	0	0.07	0	0	0.04	0.09
Lysine	0	0	0	0	0.08	0	0	0.04	0.1
C14H2-01	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0
C16H3-01	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0
C16H3-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C16H3-03	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0
C16H3-04	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0
C18H3-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
C18H3-02	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0
C18H3-03	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0
C18H3-04	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0
TGC14-01	0	0.09	0	0	0.01	0	0	0	0
TGC16-01	0	0.22	0	0	0.01	0	0	0	0
TGC16-02	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0
TGC16-03	0	0.09	0	0	0.01	0	0	0	0
TGC16-04	0	0.08	0	0	0.01	0	0	0	0
TGC18-01	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0
TGC18-02	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0
TGC18-03	0	0.16	0	0	0.01	0	0	0	0
TGC18-04	0	0.15	0	0	0.01	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O	0	0	0.01	0.01	0.14	0.01	0.43	0	0
CH <sub>3</sub> OH	0.01	0	0.65	0.65	0	0.64	0.37	0.36	0
CHCl <sub>3</sub>	0.98	0.01	0.34	0.34	0	0.33	0.2	0.19	0