

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del catálogo en línea, página web y Repositorio Institucional del CRAI-USTA, así como en las redes sociales y demás sitios web de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor, nunca para usos comerciales.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

**Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA
Universidad Santo Tomás, Bucaramanga**

**Análisis Exergoambiental del Proceso de Obtención de Aceite de Sacha Inchi (*Plukenetia
Volubilis*) en Santander Colombia**

Nancy Consuelo González González

**Trabajo de grado presentado para optar el título de Magíster Ciencias y Tecnologías
ambientales**

Directora

Viviana Quintero Dallos

Ingeniera Química Ph.D.

Co-directoras

Claudia Valderrama

Ingeniera Química, Mag.

Martha Cervantes Díaz

Química, M.Sc.

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Química Ambiental

2021

Agradecimientos

Gracias a Dios por la sabiduría, ciencia y el conocimiento que puso en mi para realizar esta
investigación.

A la Doctora Viviana Quintero por su apoyo, paciencia y dedicación en el desarrollo de esta
investigación de maestría.

A la Ingeniera Claudia Valderrama, la coordinadora Martha Cervantes por guiarme con su
conocimiento.

A mis padres y hermanos y aquellas personas que fueron baluarte incondicional.

A la Universidad Santo Tomás seccional Bucaramanga por la financiación del proyecto a
través de la XI Convocatoria de Investigación (Acta 23 2019 proyecto 36) y la Universidad
Mariana Pasto Nariño.

A la Asociación de Cultivadores y Empresarios de Sacha inchi en Santander.

Contenido

Introducción	20
1. Análisis Exergoambiental del Proceso de Obtención de Aceite de Sacha Inchi (<i>Plukenetia Volubilis</i>) en Santander Colombia.....	23
1.1 Objetivos.....	23
1.1.1 Objetivo General.....	23
1.1.2 Objetivo Específicos.....	23
2. Marco Referencial.....	24
2.1 Marco Teórico.....	24
2.1.1 Generalidades.....	24
2.1.2 Caracterización Físicoquímica del Aceite Sacha Inchi	25
2.1.3 Tecnología de Extracción del Aceite.....	26
2.1.3.1 Esquema General para la Obtención de Aceite Sacha Inchi por Prensado en Frio.....	28
2.1.4 Estrategias de Valorización de Corrientes Intermedias del Proceso de Obtención de Aceite Sacha Inchi	29
2.1.4.1 Cogeneración.....	30
2.1.4.2 Aislado de Proteína.....	31
2.1.5 Análisis Exergoambiental.....	33
2.1.5.1 Análisis Exergético.....	33
2.1.5.2 Análisis de Ciclo de Vida.....	36
2.1.5.3 Evaluación Exergoambiental.....	38
2.2 Marco de Antecedentes.....	40

2.3	Análisis del Estado del Arte.....	45
3.	Metodología.....	58
3.1	Análisis Exergoambiental del Proceso de Obtención de Aceite Caso Base.....	59
3.1.1	Análisis Exergético.....	59
3.1.1.1	Análisis del Proceso.....	59
3.1.1.2	Evaluación Exergética.....	61
3.1.1.3	Diagrama Exergético.....	62
3.1.2	Análisis de Ciclo de Vida.....	62
3.1.2.1	Definición del Objetivo y Alcance del Estudio.....	62
3.1.2.2	Análisis del Inventario.....	64
3.1.2.3	Evaluación de Impacto.....	65
3.1.3	Evaluación Exergoambiental.....	67
3.2	Definición de Estrategias de Valoración de las Corrientes Intermedias del Proceso.....	67
3.3	Análisis Exergoambiental de las Estrategias de Valorización del Proceso de Obtención de Aceite Sacha Inchi.....	68
4.	Resultados y Discusión.....	71
4.1	Análisis Exergoambiental del Proceso Obtención de Aceite Sacha Inchi Caso Base.....	71
4.1.1	Análisis Exergético.....	71
4.1.1.1	Simulación del Proceso.....	72
4.1.1.2	Evaluación Exergética.....	74
4.1.1.3	Diagrama Exergético Ternario para el Proceso Caso Base.....	79
4.1.2	Análisis de Ciclo de Vida.....	81

4.1.2.1 Evaluación e Interpretación ACV del proceso caso base.....	82
4.1.2.1.1 Diagrama de Árbol de Procesos del Caso Base.....	83
4.1.2.1.2 Puntuación Única de Impacto Ambiental para la Obtención de Aceite Caso Base.....	84
4.1.2.1.3 Caracterización de emisiones atmosféricas del proceso.....	85
4.1.2.1.4 Evaluación por Consumos de Recursos en la Obtención de Aceite Sacha Inchi.....	86
4.1.2.1.5 Estimación de la Huella de Carbono del Proceso.....	88
4.1.3 Evaluación Exergoambiental del Proceso Caso Base	88
4.2 Diseño de Estrategias de Valorización de Corrientes del Proceso de Obtención de Aceite...	93
4.3 Análisis Exergoambiental de Las Estrategias de Valorización del Proceso de Obtención de Aceite Sacha Inchi.....	95
4.3.1 Análisis Exergético Del Esquema Biorrefinería De Obtención De Aceite	95
4.3.1.1 Simulación de las Estrategias de Valorización del Esquema Biorrefinería.....	95
4.3.1.2 Evaluación Exergética de las Estrategias de Valorización de las Corrientes Intermedias del Proceso de Obtención de Aceite Sacha Inchi.....	103
4.3.1.3 Diagrama Exergético Ternario del Esquema Biorrefinería.....	107
4.3.2 Análisis Ambiental del Esquema Biorrefinería del aceite Sacha Inchi.....	108
4.3.2.1 Definición del Objetivo y Alcance.....	108
4.3.2.2 Análisis del Inventario.....	109
4.3.2.3 Evaluación e Interpretación del ACV de Obtención de Aceite Sacha Inchi bajo Concepto de Biorrefinería.....	112
4.3.2.3.1 Diagrama de Árbol del Esquema Biorrefinería.....	112
4.3.2.3.2 Puntuación Única por Etapas de la Biorrefinería.....	113

4.3.3 Evaluación Exergoambiental del Esquema Obtención de Aceite Sacha Inchi bajo

Concepto de Biorrefinería.....	119
5. Conclusiones	125
5. Divulgación de Resultados.....	127
6. Recomendaciones	130
Referencias.....	131
Apéndices	141

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Perfil de ácidos grasos del aceite Sacha inchi</i>	25
Tabla 2. <i>Ventajas y desventajas de los métodos de extracción de aceite Sacha inchi</i>	26
Tabla 3. <i>Variables exergoambientales del proceso</i>	39
Tabla 4. <i>Indicadores cuantitativos para artículos</i>	46
Tabla 5. <i>Exergía de producto y combustible del caso base</i>	61
Tabla 6. <i>Emisiones atmosféricas por consumo de 1 kg diesel por transporte</i>	65
Tabla 7. <i>Asignación de los impactos ambientales a corrientes de exergía del proceso caso base</i>	67
Tabla 8. <i>Exergía de producto y combustible de las estrategias de valorización propuestas del esquema de obtención de aceite Sacha inchi</i>	69
Tabla 9. <i>Asignación de los impactos ambientales a corrientes de exergía del esquema biorrefinería</i>	70
Tabla 10. <i>Principales corrientes y requerimientos energéticos del proceso caso base</i>	73
Tabla 11. <i>Evaluación exérgica de la primera separación del proceso caso base</i>	75
Tabla 12. <i>Evaluación exérgica de la segunda separación del proceso caso base</i>	76
Tabla 13. <i>Evaluación exérgica de la etapa extracción del proceso caso base</i>	77
Tabla 14. <i>Evaluación exérgica de la etapa filtración caso base</i>	78
Tabla 15. <i>Inventario para la producción de 1 litro de aceite de Sacha inchi caso base</i>	81
Tabla 16. <i>Flujo de impactos ambientales e impactos ambientales específicos del esquema base</i>	89

Tabla 17. <i>Reacciones químicas del proceso de combustión de la biomasa</i>	97
Tabla 18. <i>Propiedades energéticas de las principales corrientes de la caldera</i>	98
Tabla 19. <i>Condiciones de operación y potencia producida en las turbinas</i>	100
Tabla 20. <i>Propiedades fisicoquímicas de las corrientes principales del aislamiento proteico.</i>	102
Tabla 21. <i>Evaluación exergética de la etapa cogeneración del esquema biorrefinería</i>	104
Tabla 22. <i>Evaluación exergética del aislamiento proteico del esquema biorrefinería</i>	106
Tabla 23 . <i>Factores de asignación de la producción de aceite Sacha inchi esquema biorrefinería</i>	109
Tabla 24. <i>Inventario para la etapa cogeneración en el esquema biorrefinería</i>	110
Tabla 25. <i>Emisiones atmosféricas por combustión en la etapa cogeneración</i>	110
Tabla 26. <i>Inventario para la etapa aislamiento en el esquema de biorrefinería</i>	111
Tabla 27. <i>Resultados del balance de impacto ambientales del esquema biorrefinería</i>	120
Tabla 28. <i>Composición porcentual de la semilla, cáscara, almendra y torta</i>	141
Tabla 29. <i>Información para la estimación del cambio de uso de suelo</i>	142
Tabla 30. <i>Parámetros para el cambio en el uso directo de la tierra para el cultivo Sacha inchi</i>	143
Tabla 31. <i>Exergía química específicas de las componentes de las corrientes del proceso.</i>	144
Tabla 32. <i>Composiciones del flujo del esquema base de obtención aceite Sacha inchi</i>	145
Tabla 33. <i>Composiciones de flujo de la caldera etapa cogeneración.</i>	146
Tabla 34. <i>Datos termodinámicos de las corrientes en la turbina etapa cogeneración</i>	147
Tabla 35. <i>Composiciones de las corrientes principales de la etapa aislamiento proteico</i>	149

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Proceso productivo del Sacha inchi por prensado en frío</i>	28
Figura 2. <i>Sistema de cogeneración con turbina extracción condensación</i>	31
Figura 3. <i>Definición de exergía</i>	33
Figura 4. <i>Metodología seguida para la cienciometría</i>	47
Figura 5. <i>Distribución por año de artículos asociados con la investigación sobre Sacha inchi</i>	48
Figura 6. <i>Distribución de artículos relacionados con Sacha inchi por área de conocimiento ...</i>	49
Figura 7. <i>Distribución de artículos relacionados con Sacha inchi por países a nivel mundial ..</i>	50
Figura 8. <i>Distribución por instituciones de las publicaciones relacionadas con la Sacha inchi a nivel mundial</i>	50
Figura 9. <i>Participación de instituciones en publicaciones relacionadas con la Sacha inchi a nivel nacional</i>	51
Figura 10. <i>Palabras clave más empleadas por los autores como descriptores de la investigación relacionada con Sacha inchi</i>	52
Figura 11. <i>Distribución por año de artículos asociados con la investigación sobre análisis exergoambiental y exergía</i>	53
Figura 12. <i>Distribución de artículos relacionados con análisis exergoambiental y exergía por área de conocimiento</i>	54
Figura 13. <i>Distribución de artículos relacionados sobre análisis exergoambiental y exergía por países a nivel mundial</i>	54

Figura 14. <i>Distribución por instituciones de las publicaciones relacionadas sobre análisis exergoambiental y exergía por países a nivel mundial</i>	55
Figura 15. <i>Palabras clave más empleadas por los autores como descriptores de la investigación relacionada con exergía y exergo ambiental</i>	56
Figura 16. <i>Matriz relacional de aceites vegetales más estudiados bajo el concepto de exergía y exergoambiental</i>	57
Figura 17. <i>Metodología seguida para el análisis exergoambiental</i>	58
Figura 18. <i>Esquema de producción de la fase industrial del caso base</i>	60
Figura 19. <i>Simulación del proceso de extracción de aceite</i>	72
Figura 20. <i>Diagrama ternario exergético del proceso obtención de aceite caso base</i>	80
Figura 21. <i>Árbol de flujo del proceso de obtención de aceite Sacha inchi caso base</i>	83
Figura 22. <i>Evaluación de puntuación única para categorías de impacto medio caso base</i>	85
Figura 23. <i>Emisiones atmosféricas en el proceso de obtención de aceite caso base</i>	86
Figura 24. <i>Contribución ambiental global por materias primas e insumos energéticos en el proceso caso base</i>	87
Figura 25. <i>Impacto ambiental específico de combustible y producto del proceso caso base</i>	90
Figura 26. <i>Tasa de impactos ambientales por destrucción de exergía por etapas en la obtención de aceite caso base</i>	91
Figura 27. <i>Diferencia relativa del impacto ambiental específico de las etapas del proceso caso base</i>	92
Figura 28. <i>Esquema general de la biorrefinería de obtención aceite Sacha inchi</i>	94
Figura 29. <i>Esquema de la caldera en Aspen Plus</i>	96

Figura 30. <i>Esquema de la turbina en Aspen Plus</i>	99
Figura 31. <i>Diagrama de flujo del aislamiento de proteína en Aspen Plus</i>	101
Figura 32. <i>Diagrama ternario exergético del esquema biorrefinería</i>	107
Figura 33. <i>Representación del árbol de procesos del esquema biorrefinería</i>	113
Figura 34. <i>Evaluación de categorías de impacto medio en las etapas del esquema biorrefinería</i>	114
Figura 35. <i>Puntuación única de impacto ambiental para las etapas del esquema biorrefinería</i>	115
Figura 36. <i>Evaluación de emisiones atmosféricas en el esquema biorrefinería</i>	116
Figura 37. <i>Evaluación por subprocesos de la biorrefinería</i>	117
Figura 38. <i>Resultados de los impactos ambientales del caso base y los posibles esquemas de valorización</i>	118
Figura 39. <i>Impacto ambiental específico de combustible y producto en el esquema biorrefinería</i>	121
Figura 40. <i>Tasa de impactos ambientales por destrucción de exergía del esquema biorrefinería</i>	123
Figura 41. <i>Diferencia relativa de impacto ambiental por etapa del esquema biorrefinería</i>	124
Figura 42. <i>Constancia de presentación en la Convocatoria de Capítulos del Libro USTA</i>	127
Figura 43. <i>Constancia de presentación del trabajo en CICI 2020</i>	128
Figura 44. <i>Certificado de participación modalidad póster en el 30 Congreso de Ingeniería Química año 2020</i>	129

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Caracterización fisicoquímica de las corrientes principales de la obtención de aceite Sacha inchi	141
Apéndice B. Estimación de cambio de uso suelo.....	142
Apéndice C. Exergía química específica de compuestos químicos	144
Apéndice D. Balance de masa del proceso obtención de aceite caso base	145
Apéndice E. Resultados de la simulación en Aspen Plus para la cogeneración y aislamiento proteico en el esquema de biorrefinería	146

Lista de Abreviaturas

ACV	Análisis de Ciclo de Vida
Q	Calor
ρ	Densidad
$r_{b,k}$	Diferencia relativa de impacto ambiental específico
ε_k	Eficiencia exergética
H	Entalpia del componente
S	Entropía del componente
E_D	Exergía destruida
Ex_Q	Exergía de calor
$\dot{E}_{F,k}$	Exergía de combustible
Ex_j	Exergía de flujo
Ex_{ch}	Exergía de flujo componente químico
Ex_{ph}	Exergía de flujo componente físico
$\dot{E}_{P,k}$	Exergía de producto
E_{ch}	Exergía química específica de cada componente
Ex_W	Exergía de trabajo
$\dot{B}_{D,k}$	Flujo de impacto ambiental asociada con la destrucción de exergía.
\dot{B}_j	Flujo de impacto ambiental de corriente

\dot{m}	Flujo másico
Ha	Hectárea
b_j	Impacto ambiental específico de la corriente
$b_{F,k}$	Impacto ambiental específico de combustible
$b_{P,k}$	Impacto ambiental específico de producto
IE	Indicador de eficiencia intrínseca
II	Indicador de irreversibilidad intrínseca
IW	Indicador de residuos intrínseco
Ω	Omega
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
P	Presión
T	Temperatura
T	Tonelada
UF	Unidad funcional

Resumen

En los últimos años existe la tendencia creciente de consumo de aceite Sacha inchi (*Plukenetia volubilis*) y su participación en la economía del país, lo convierte en una idea de negocio para el sector agroindustrial. Este estudio propone un análisis exergoambiental para la obtención de aceite Sacha inchi por prensado en frío, tomando un estudio de caso en Santander. Además, se direccionó en la identificación de productos de valor agregado a partir de los residuos sólidos generados bajo el concepto de biorrefinería. La investigación se basó en el análisis exergético, ambiental y la estimación de variables exergoambientales en ambos esquemas. La simulación del proceso se llevó a cabo en Aspen Plus. La evaluación de los impactos ambientales se realizó en el software *SimaPro 9.0*, utilizando el método *Impact 2002+*. Se encontró que el alto consumo de electricidad en la prensa afectó la eficiencia exergética global en 97% del caso base. Del mismo modo, la combustión en la caldera representó el 64,26% de las irreversibilidades en la biorrefinería. El análisis de ciclo vida determinó que el consumo de diesel y hexano, representó el 45% y 41% respectivamente de la carga ambiental de la biorrefinería, con mayor afectación en la categoría de respiratorios inorgánicos y energías no renovables. La producción de aceite Sacha inchi resultó en un impacto ambiental de 13,58 mPt/h, que logró ser reducido en un 11%, con un 49% de autosuficiencia energética del proceso, donde la generación de electricidad estuvo asociada a 91,58 mPt/GJ. Finalmente, la producción de aceite conjunta con el concentrado alcanzó valores de 60,43 mPt/h.

Palabras Clave: Sacha inchi, exergoambiental, simulación, exergía, cogeneración, aislado proteico.

Abstract

In recent years there has been a growing trend in the consumption of Sacha inchi oil and its participation in the country's economy, which makes it a business idea that is attractive for the agro-industrial sector. This study proposes an exergo-environmental analysis for the process of obtaining Sacha inchi oil under the cold pressing, taking a case study in Santander department- In addition, it was directed at the identification of value-added products from the solid waste generated with technologies under the concept of biorefinery. The research was based on the exergy and environmental analysis and the estimation of exergy-environmental variables in both schemes. The simulation of the production process was carried out in Aspen Plus. The evaluation of the environmental impacts was carried out in the SimaPro 9.0 software, using the Impact 2002+ method. It was found that the high consumption of electrical work in the press (97% of the process), affected the global exergetic efficiency. Similarly, the combustion reactions in the boiler represented 64.26% of the irreversibilities in the biorefinery scheme. The life cycle analysis determined that the consumption of diesel and hexane represents 45% and 41% respectively of the environmental load of the biorefinery, mainly affecting the category of inorganic respiratory and non-renewable energies. The production of Sacha inchi oil resulted in an environmental impact of 13.58 mPt/h, which managed to be reduced by 11 %, with 49% energy self-sufficiency in the production process, where the specific environmental impacts of electricity were of 91.58 mPt/GJ. Finally, the oil production together with the concentrate reached values of 60.43 mPt / h.

Keywords: Sacha inchi, exergoenvironmental, simulation, exergy, cogeneration, protein isolation.

Glosario

Aislado Proteico: es una fuente no convencional de suministro alimenticio caracterizado por contener al menos el 90% de proteína (Mercado R. et al., 2015, p.160).

Almendra de Sacha inchi: estructura interna del fruto sachá inchi con alto contenido oleaginoso (Gutiérrez et al., 2011, p,76).

Análisis exergético: herramienta que permite localizar las ineficiencias termodinámicas de un proceso y muestra "las causas de las ineficiencias termodinámicas"(Morozyuk et al., 2016, p.4).

Análisis exergoambiental: herramienta que permite identificar la contribución relativa de cada unidad de operación y las opciones para reducir el impacto ambiental asociado al sistema(Morozyuk et al., 2016, p.1).

Biomasa: material orgánico de origen vegetal y animal posible de ser convertido en combustible gaseoso(Minambiente, 2018).

Biorrefinería: se define como una instalación industrial que integra tecnologías de conversión de biomasa y procesos para la producción simultánea de combustibles, energía y productos químicos a partir de biomasa(NREL, 2008).

Cáscara: segunda envoltura del fruto Sacha inchi la cual posee un alto contenido de fibra(Hurtado, 2013, p.18)

Ciclo de vida: etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final (Taldea, 2009, p,4).

Coproducto: cualquier producto de entre dos o más productos provenientes del mismo proceso unitario o sistema del producto (Jolliet et al., 2016, p.85).

Estrella: cápsula dehiscente correspondiente a la primera envoltura del fruto Sacha inchi (SachaColombia, 2018).

Exergía de combustible: son considerados todos los flujos de exergía de entrada a la unidad de operación, incluso los requerimientos de energía, además está relacionado con la reducción de exergía entre los flujos de entrada y salida (Lazzaretto & Tsatsaronis, 2006, p.1260).

Exergía de producto: son considerados todos los flujos de salida, incluso la exergía de los flujos de energía generados en la etapa, así mismo, todo incremento de exergía entre la entrada y salida que esté de acuerdo a la unidad de operación (Lazzaretto & Tsatsaronis, 2006, p.1261).

Impacto ambiental: cualquier cambio en el medio ambiente, sea adverso o benéfico, en forma parcial o total, resultado de las actividades, productos o servicios de una organización (Chacón, 2008, p.56).

Indicador de categoría de impacto: representación cuantificable de una categoría de impacto (Jolliet et al., 2016, p.109).

Semilla Sacha inchi: parte del fruto sachá inchi contenida en la cápsula en forma de estrella (SachaColombia, 2018).

Subproducto: residuo que se puede aprovechar dentro del mismo producto (Jolliet et al., 2016, p.85).

Torta: es el residuo que se obtiene en el prensado en frío correspondiendo a la parte de la almendra que contenía el aceite y que al ser extraído posee una muy baja cantidad de aceite en condiciones normales (Osorio, 2016, p.25).

Introducción

Actualmente, el aceite de Sacha inchi constituye un producto potencial en la industria alimentaria, cosmética y farmacéutica, debido a su alto contenido de ácidos grasos de poliinsaturados (PUFA) (cerca del 85% del contenido total de aceite)(Fanali et al., 2011); y la presencia de compuestos bioactivos, tales como tocoferoles, carotenos, compuestos polifenólicos y fitoesteroles (Chirinos et al., 2013, p.1735).

Dicho aceite, es obtenido de la planta oleaginosa Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis*) conocida también “Maní forestal, las cuales se caracterizan por ser plantas anuales trepadoras y sus frutos capsulares. Esta especie vegetal se encuentra naturalmente en regiones de clima de selva tropical en América del sur. Se cultiva fácilmente entre los 30 y 2110 m.s.n.m. a temperaturas entre 10 a 36°C (Bueno-Borges et al., 2018, p.4160). Sus frutos están formados por cuatro cápsulas dehiscentes, dónde se encuentran las semillas que son de color marrón oscuro, ovaladas y con un diámetro de 1,5 a 2 centímetros(Kodahl, 2020, p.6).

A nivel mundial, la transformación y exportación de Sacha inchi está liderado por Perú, que en el 2017 exportó US\$2.028.620 y su principal comprador fue Corea del Sur con una participación en el mercado del 61% (Comtrade, 2018). Por otro lado, es importante resaltar que el mercado de la Sacha Inchi, no sólo se direcciona al aceite, también se comercializan productos de valor agregado como proteínas, *snacks*, cápsulas que provienen de corrientes intermedias del proceso, los cuales correspondieron al 78 % de las exportaciones registradas en el caso de Perú.

En Colombia, el cultivo de Sacha inchi, constituye una estrategia para la mitigación de cultivos ilícitos debido a que para los agricultores representan retornos económicos similares(Revista Dinero, 2019). En el año 2018, en Colombia se cosecharon 2419 toneladas de fruto Sacha Inchi en

760 hectáreas, siendo los departamentos con mayor participación: Caquetá 37%, Valle del Cauca 20% y Putumayo 18% (Minambiente, 2018).

A nivel comercial, se cuantificaron cerca de 290 toneladas de aceite, los cuales fueron producidos por 25 empresas de acuerdo con datos suministrados de la Cooperativa Sacha Colombia, bajo la configuración tecnológica de prensado en frío (Sacha Colombia, 2018), la cual no requiere el ingreso de solventes, entregando un aceite con propiedades óptimas para el consumo humano y con menor impacto ambiental. Sin embargo, los esquemas de proceso existentes muestran la necesidad de diversificar la canasta de productos y valorizar las corrientes intermedias conocidas como residuos para mejorar su productividad económica y la disminución de impacto ambiental.

El departamento de Santander cuenta con las características agronómicas y climáticas requeridas para el cultivo de sacha inchi, factores que se han aprovechado para avanzar en su tecnificación, de allí que en el momento se está gestando una cadena agroindustrial de obtención de su aceite (estudio de caso), que pueda llegar a competir con empresas del Perú, país con mayor producción y exportación actual de almendra de sacha inchi y de su aceite. Pero, el proceso de extracción de aceite genera residuos sólidos (estrella, cáscara, torta), el 85% del peso del fruto, que actualmente están siendo desechados, influyendo negativamente en el medio y desperdiciando sus potencialidades nutricionales. Adicionalmente, el proceso de estudio presenta bajos porcentajes de extracción (60%) e involucra consumo de electricidad para su funcionamiento.

El objetivo de este trabajo consistió en realizar un ejercicio de ingeniería, conducente a identificar las ineficiencias e impactos ambientales del proceso de obtención de aceite de Sacha inchi con la finalidad de proponer mejoramiento en las técnicas y de la misma manera evaluarlas

dentro de un esquema de biorrefinería, a partir de la evaluación exergoambiental la cual constituye una herramienta de análisis de exergía de todo el ciclo de vida completo, lo que permite lograr una mejor gestión de recursos, al considerar los impactos ambientales por emisiones de residuos, consumo de recursos naturales y destrucción de exergía del sistema de estudio(Salehi et al., 2018, p.1074).

1. Análisis Exergoambiental del Proceso de Obtención de Aceite de Sacha Inchi

***(Plukenetia Volubilis)* en Santander Colombia**

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

Evaluar la eficiencia del proceso de obtención de aceite de Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis*) en el departamento de Santander mediante el análisis exergo-ambiental con el propósito de establecer estrategias que permitan valorizar la cadena agroindustrial de la región.

1.1.2 Objetivo Específicos

1. Determinar las condiciones de operación y requerimientos másicos y energéticos del proceso de obtención de aceite de Sacha Inchi.
2. Aplicar el análisis exergético al proceso de obtención de aceite Sacha Inchi con el fin de identificar los posibles puntos de valorización de las corrientes secundarias de este proceso.
3. Evaluar los impactos potenciales al medio ambiente asociados al proceso de obtención de aceite Sacha Inchi mediante la metodología de análisis de ciclo de vida.
4. Realizar una evaluación exergo-ambiental con el propósito de proponer indicadores asociados con eficiencia del recurso que permitan direccionar las mejoras del proceso.

2. Marco Referencial

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Generalidades

La Sacha inchi (*Plukenetia volubilis*) es una planta oleaginosa adaptable a diferentes pisos térmicos, desde los 100 hasta los 2.600 msnm, dado que en realidad existen un número de especies (Kodahl, 2020, p.3). La especie *Plukenetia Volubilis Linneo* variedad Catio215 es recomendada para climas templados o cálidos, desarrollándose bien y produciendo en cualquier tipo de suelo con excepción de los que presenta deficiencia de drenaje, debido a su sensibilidad por exceso de agua en sus raíces (SachaColombia, 2018).

El sistema de manejo del cultivo incluye procesos de adecuación del terreno, aplicación de enmiendas y mejoradores del suelo e implementación de tutores, podas, programas de fertilización, y manejo de arvenses (SachaColombia, 2018). En clima templado o cálido, la cosecha inicia a partir de los 150 días de germinadas las semillas y una vez recolectada, el fruto es secado y almacenado, pues un adecuado manejo garantizará productos terminados que cumplan con los estándares microbiológicos y fisicoquímicos para alimentos (Osorio, 2016, p.10). De acuerdo con el informe reportado por (SachaColombia, 2018), en un año de cosecha (entre el mes 7 y mes 19) la producción media está cerca de 3 t de fruto Sacha inchi, teniendo producciones en el país que oscilan entre 1,6 t hasta 5,8 t por hectárea, consecuente de la tecnología utilizada en el manejo agronómico.

En varias investigaciones realizadas en los últimos años, se evidencia la composición fisicoquímica de la almendra y la cáscara, las cuales constituyen la semilla Sacha inchi. En la

almendra de esta planta, el contenido de lípidos es del 43%: incluido los ácidos grasos Omega 3, 6 y 9, además de proteínas (29%), fibra bruta (3%) y carbohidratos (16%) (Hurtado, 2013, p.45). En cuanto la cáscara Sacha inchi tiene altos contenidos de fibra (77,84%) pero presenta baja composición de grasa (0,39%), proteína (2,75%) y ceniza (1,75%)(Benítez et al., 2015, p.30). En consideración con lo anterior, los componentes de la Sacha inchi le han dado un valor agregado competitivo en el mercado de los ingredientes naturales (Avila-sosa et al., 2019, p.6).

2.1.2 Caracterización Fisicoquímica del Aceite Sacha Inchi

El aceite Sacha inchi es una de las dos fuentes naturales conocidas que tiene el mayor contenido de ácido alfa-linolénico (C18: 3, ω 3) con una composición en masa menor del 4% de la reportada para el aceite de linaza (Filippo & Antonioli, 2013, p.29). Debido a que este aceite posee a su vez, cantidades importantes de ácidos grasos insaturados ácido linoléico (C18: 2, ω 6) y ácido oleico (C18: 1, ω 9) tal como se muestra en la Tabla 1; la agroindustria colombiana de la Sacha inchi se ha direccionado hacia la producción de aceite “extra virgen”.

Tabla 1. Perfil de ácidos grasos del aceite Sacha inchi

	Ácido graso	Composición %
C16:0	Palmítico	4,20
C 17:0	Margárico	0,09
C 18:0	Esteárico	2,89
C 18:1	Oleico (ω 9)	8,45

Ácido graso		Composición
		%
C 18:2	Linoléico ($\omega 6$)	35,3
C 18:3	Linolénico ($\omega 3$)	47,7

Nota: aceite extraído por prensado en frío. Adoptado de (Hurtado, 2013, p.49).

2.1.3 Tecnología de Extracción del Aceite

En la literatura se registran diferentes métodos de extracción de aceite a partir de las almendras Sacha inchi, los cuales varían en el rendimiento, calidad y contenido de ácidos grasos del aceite, además, en los impactos sociales, ambientales y económicos que puedan generarse del proceso. Entre los métodos más conocidos se pueden mencionar los mecánicos y químicos (Gutiérrez et al., 2017, p.16), los cuales son descritos en la Tabla 2.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los métodos de extracción de aceite Sacha inchi

Método de extracción	Técnica de extracción	Ventajas	Desventajas
Compresión de la almendra	Prensado en frío (Método discontinuo)	Mejor conservación de los componentes	Bajos rendimientos de extracción (60%-70%)
	Prensado de tornillo (Método continuo)	antioxidantes del aceite.	
Líquido supercrítico	Utilización del CO ₂ en estado supercrítico	Se alcanzan rendimientos de extracción (60%-80%) y no requiere retirar los solventes del aceite ni de la torta residual.	Las instalaciones y los equipos para este tipo de instalaciones resultan más complejas y costosas

Método de extracción	Técnica de extracción	Ventajas	Desventajas
Solvente	Método Soxhlet, usando como solvente el hexano.	Favorece las características funcionales del aceite. Se alcanzan eficiencias de extracción del 97%.	las Pérdidas de antioxidantes. Riesgo potencial de contaminación y afectación en la salud del personal por el uso de hexano.

Nota: Adoptado de Diseño y construcción de un prototipo para la extracción continua de aceite de la semilla Sacha inchi con un proceso de prensado en frío por (Gutiérrez et al., 2017, p.16).

En Colombia, la técnica de extracción del aceite Sacha inchi más común es el prensado en frío, con un rendimiento de 1 litro de aceite por 5 kg de almendra procesada ,aunque esta proporción puede variar entre 4:1 y 6:1, según la variedad de la almendra utilizada y la tecnología que se configura en la transformación en aceite(SachaColombia,2019). Ayala(2016), comparó el rendimiento de 3 variedades con extracción a través de prensado en frío, encontrando rendimientos del 53% para la variedad INCA-1, 43% para CATIO-2 y 41% para NUKAK-3 (p. 47).

Por otro lado, de acuerdo con Hincapié (2016) se puede demostrar que se alcanzan rendimientos de aceite cerca del 84% con la técnica de extracción por solventes, valores superiores a los reportados para prensado en frío (p. 11). Sin embargo, el uso de solventes orgánicos como el hexano puede generar contaminación del aceite con residuos tóxicos, cambios en las características organolépticas (color, aroma) del aceite, emisión de compuestos orgánicos volátiles al medio ambiente y problemas de salud para las personas que lo manipulan si no se toman las medidas de seguridad adecuadas (Kodahl,2020, p.5). Adicionalmente las condiciones de operación

de la extracción alcanzan temperaturas de 50°C, las cuales aumentan el riesgo de degradación térmica del aceite(SachaColombia, 2018).

2.1.3.1 Esquema General para la Obtención de Aceite Sacha Inchi por Prensado en Frío.

En la Figura 1 se presentan las diferentes etapas que involucra la obtención de aceite Sacha inchi desde la cosecha hasta el producto final, utilizando la técnica del prensado en frío.

Figura 1. *Proceso productivo del Sacha inchi por prensado en frío*



Tras la cosecha del Sacha inchi se configuran cuatro operaciones físicas unitarias descritas así: en la primera se realiza inicialmente un proceso manual de acondicionamiento como liberación del fruto de tallos, hojas, etc; es decir, de material indeseable y contaminante, y termina con la remoción la estrella (50% en masa del fruto) de forma mecánica, utilizándose equipos con mecanismos de fricción(ABC MACHINERY, 2019). En segundo lugar, con la finalidad de liberar la almendra (65% en masa) de la cáscara que la contiene, entra a una etapa de separación. Para tal fin se realiza con ayuda de dispositivos diseñados con mecanismos de impacto (Berrones, 2017, p.26)

Seguidamente, para la extracción del aceite contenido en la almendra se utiliza una prensa que consiste en un pistón y un cilindro, lo cual funciona mediante una unidad hidráulica. Obteniéndose de esta manera aceite extra virgen, el cual recibe este nombre por no haber sido intervenido en procesos de temperatura superior a 46°C o uso de solventes químicos (Berrones, 2017, p-12). Finalmente, con el propósito de separar las partículas presentes en el aceite se utiliza un equipo de filtro prensa a alta presión que consiste en una serie de placas filtrantes de membranas (Berrones, 2017, pp. 43-45).

2.1.4 Estrategias de Valorización de Corrientes Intermedias del Proceso de Obtención de Aceite Sacha Inchi

Teniendo en cuenta que en el proceso productivo se identifican tres corrientes intermedias: estrella, cáscara y torta; las cuales constituyen el 85% en peso del fruto Sacha inchi (Berrones, 2017, p.24); en la literatura se reportan estudios en que estos son aprovechados como materia prima para otros procesos. El material cáscara se ha utilizado en procesos de gasificación (Lakkhana et al., 2017, p.870), como absorbente en sistemas de eliminación de Pb^{2+} y Cu^{2+} de soluciones acuosas (Kumar, Smita, Sánchez, et al., 2016, pp 152-158) y también en la síntesis y estabilización de las nanopartículas de plata (Kumar, Smita, Sánchez, et al., 2016, p-293). El residuo estrella ha sido aprovechado en la fabricación de fertilizantes y jabones (Osorio, 2016, p.32).

Con respecto a la torta, al ser en una fuente de proteínas y aminoácidos esenciales puede ser aprovechada en la obtención de subproductos como proteína concentrada apta para la alimentación (Aquino, 2015, p.8). Existen diferentes métodos de extracción para las proteínas: extracción alcalina con precipitación alcalina, extracción alcalina con adición de sal y extracción

enzimática asistida(Aquino, 2015, pp.16-18). Mercado R. et al.,(2015) eligió el método extracción alcalina y precipitación isoeléctrica para la obtención del aislado de torta Sacha inchi alcanzando rendimientos de 65,4% (p.162).

En este documento se especificará la cogeneración debido a que se implementó en el estudio, del mismo modo el aislamiento proteico de la cual se dispone datos experimentales reportados por Rodriguez (2020) en su investigación adscrita al Grupo de Investigaciones Ambientales para el Desarrollo Sostenible –GIADS de la Universidad Santo Tomás- Bucaramanga, Santander(p.13).

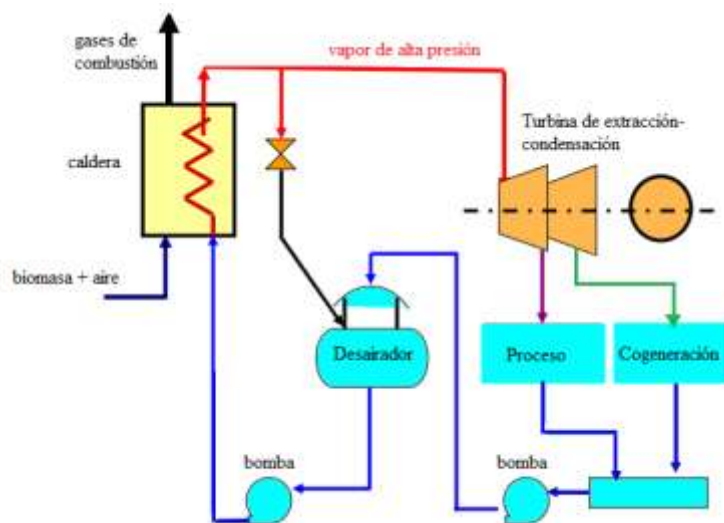
2.1.4.1 Cogeneración. La cogeneración es la producción combinada de energía térmica(calor o frío útil) y energía eléctrica para su uso o para venta parcial o total(IDAE, 2007, p.13). Las ventajas principales que aporta la cogeneración en el sector energético respecto a las centrales convencionales son las siguientes: menor dependencia de los combustibles fósiles, baja pérdida de energía por transporte y menor costo de producción e impacto ambiental (IDAE, 2007, p.10).

En procesos de cogeneración que usan biomasa lignocelulósica, se aplican todos los ciclos de vapor utilizados con otros combustibles. En Brasil, diversos sistemas de cogeneración mejorados se han establecido en plantas de caña de azúcar, adoptando condiciones de vapor de alta presión y alta temperatura; tal como el ciclo Rankine con turbinas de extracción-condensación a presión de 60 bar y temperaturas entre 480°C-520°C(Rocha, 2019, p.51), las cuales pueden alcanzar valores de eficiencia global entre 60-80% (BEE, 2006, p.5).

En el ciclo termodinámico Rankine con extracción-condensación tal como se muestra en la Figura 2, la biomasa es quemada en la caldera para la producción de vapor, el cual existe la posibilidad de extraer parte del vapor antes de ser conducido a una turbina de vapor, donde se

expande y da lugar a la producción de energía mecánica la cual es empleada para mover un generador eléctrico. Como productos de la turbina se obtienen electricidad y vapor de baja presión cuya energía se aprovecha en cualquier proceso que requiera calor y devuelta al sistema como condensado (Rocha, 2019, p.8).

Figura 2. Sistema de cogeneración con turbina extracción condensación



Adaptado de (BEE,2006, p.9).

2.1.4.2 Aislado de Proteína. La almendra Sacha inchi contiene alto contenido de proteínas (27%), específicamente en aminoácidos como la cistina, tirosina, treonina y triptófano. La proteína al ser aislada podría ser utilizada con éxito en la industria alimentaria, siempre y cuando posean propiedades tecno-funcionales. El proceso de aislado consiste en la eliminación los antinutrientes

que puede contener, mediante técnicas de concentración de proteínas como la extracción alcalina y precipitación, (Mercado R. et al., 2015, p.160).

La almendra Sacha inchi contiene alto contenido de proteínas (27%), específicamente en aminoácidos como la cistina, tirosina, treonina y triptófano. La proteína al ser aislada podría ser utilizada con éxito en la industria alimentaria, siempre y cuando posea propiedades tecno funcionales. El proceso de aislado consiste en la eliminación de antinutrientes que puede contener, mediante técnicas de concentración de proteínas como la extracción alcalina y precipitación (Aquino, 2015, p.11).

El método extracción /precipitación isoelectrica aprovecha la solubilidad de las proteínas, la cual es alta a pH alcalinos y baja valores cercanos al punto isoelectrico(Aquino,2015, pp.12-14). El procedimiento incluye tres etapas (Aquino, 2015, p.17); inicia con la eliminación de la grasa en forma de aceite presente en la harina que se obtuvo después de una fina molienda de la torta Sacha inchi. Posteriormente la harina, se dispersa en agua ajustando a pH alcalinos (8-11) para solubilizarla, etapa conocida como extracción alcalina. Por último, la precipitación isoelectrica se logra con la adición de un agente precipitante a la solución proteica, donde la fase sólida resultante se refiere a la proteína aislada, caracterizada por concentraciones superiores al 90%. (Haya, 2016).

Actualmente, los sistemas de producción son evaluados dentro del marco de la sostenibilidad, para tal fin se utiliza el análisis ambiental y métodos basados en criterios termodinámicos como el análisis exergético (Dincer et al., 2018, p.379). Además la fusión de dichas herramientas como lo es el análisis exergoambiental(Meyer et al., 2009, p.77).

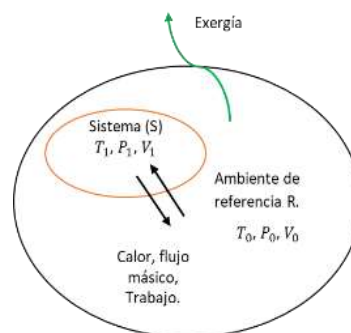
2.1.5 Análisis Exergoambiental

El análisis exergoambiental es la aplicación de un método basado en la exergía que evalúa el rendimiento ambiental y el potencial de mejora de los procesos desde el punto de vista termodinámico y ambiental. La comprensión de la relación entre la exergía y el ambiente consiste en un análisis exergético, una evaluación del ciclo de vida del impacto ambiental y una evaluación exergoambiental(Salehi et al., 2018, p.1074).

2.1.5.1 Análisis Exergético. Actualmente, constituye una herramienta potencial en la toma de decisiones, para la selección y mejora de procesos productivos debido a que permite cuantificar las imperfecciones termodinámicas como destrucciones de exergía, las cuales representan pérdidas en la calidad de la energía.

El concepto de exergía es definido como "el trabajo útil máximo que se puede extraer de un sistema a medida que se equilibra reversiblemente con su entorno (sistema de referencia)" (Salehi et al., 2018, p.1058). La interacción de exergía entre un sistema S y su ambiente de referencia R, se puede llevar a cabo por medio de flujo, calor y/o trabajo como se describe en Figura 3.

Figura 3. Definición de exergía



Adaptado de Modelamiento, integración y evaluación exergética de biomasa(Quintero 2018, p.29).

La exergía de flujo E_x , es definida como la suma en términos del componente físico Ex_f y químico Ex_q (Ver *Ecuación 1*); el componte físico relacionado con la diferencia entre las condiciones de un sistema con el ambiente de referencia y el componente químico con la interacción y el cambio de la materia del sistema, descritas de acuerdo con las *Ecuación 2* *Ecuación 3* respectivamente.

$$\text{Ecuación 1: } Ex = Ex_f + Ex_q$$

$$\text{Ecuación 2: } Ex_f = m \sum_i \left(fm_i ((h - h_0) - T_0(s - s_0)) \right)$$

Dónde n : flujo molar de la corriente, m : flujo másico de la corriente, fm_i : fracción másica del componente i en la corriente, T_0 : Temperatura del estado de referencia, h : entalpía del componente i , h_0 : entalpía del componente i a las condiciones de referencia, s : entropía del componente i , s_0 : entropía del componente i a las condiciones de referencia.

$$\text{Ecuación 3: } Ex_q = n \sum_i (x_i E_q^* + RT_0 x_i \ln(x_i))$$

Siendo x_i : fracción molar del componente i en la corriente, E_q^* : Exergía química específica de cada componente y T_0 : Temperatura del estado de referencia.

En relación con las demás transferencias de exergía de flujo como la de trabajo Ex_w , asociada con la cantidad de trabajo útil que puede tomarse de una corriente eléctrica suministrada a equipos como motores y/o otros equipos accionadores que transmitan energía a las sustancias y la de calor

Ex_Q , definida como el máximo trabajo que puede obtenerse del calor Q transmitido a las mismas temperaturas a las que se encuentra el sistema durante el proceso, son descritas en las *Ecuación 4* *Ecuación 5* respectivamente (Dincer & Ronsen, 2013, pp.24-25).

$$\text{Ecuación 4: } Ex_W = \dot{W}$$

$$\text{Ecuación 5: } Ex_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) * Q$$

Siendo $\left(1 - \frac{T_0}{T}\right)$ la eficiencia de Carnot, Q : El calor transferido, T : Temperatura de la masa de control y T_0 : Temperatura del estado de referencia.

Dadas las interacciones de flujo de exergía de entrada (*in*) y salida (*out*) del sistema con las fronteras de este, permite visualizar la calidad de la energía intercambiada y la capacidad de los sistemas para realizar trabajo útil, de esta manera, evaluar las ubicaciones y magnitudes de las destrucciones de exergía de cada etapa del sistema E_D , según lo indica la *Ecuación 6* (Dincer & Ronsen, 2013, pp 77-78).

$$\text{Ecuación 6: } E_D = \sum_j \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) Q_j - (\dot{W}) + \sum_k Ex_{in} - \sum_l Ex_{out}$$

Se debe agregar que el análisis de exergía requiere la clasificación de los flujos de exergía de producto $\dot{E}_{P,k}$ como la de combustible $\dot{E}_{F,k}$ para cada etapa del sistema, de acuerdo con lo propuesto por (Morozuyk, Tsatsaronis, & Koroneos, 2016, pp.6), además, la estimación de la variable exergética, eficiencia exergética, como parámetro de desempeño, como lo indica la *Ecuación 7*.

$$\text{Ecuación 7: } \varepsilon_k = \frac{\dot{E}_{P,k}}{\dot{E}_{F,k}}$$

Adicionalmente, el análisis exergético involucra la estimación de indicadores exergéticos (Ecuación 8 Ecuación 10) como parámetros de análisis y determinación de los puntos a mejorar en el proceso y con ello el desarrollo de alternativas ingenieriles. Para la interpretación de los resultados, se dispone del diagrama exergético ternario, donde cada etapa del proceso es localizada con un vector definido por los tres indicadores y su ubicación con respecto de los vértices determina los puntos a mejorar del proceso (Gourmelon, Théry-Hétreux, & Floquet 2017, p.306).

$$\text{Ecuación 8: } IE = \frac{\text{exergía de producto}}{\text{exergía consumida}}$$

$$\text{Ecuación 9: } II = \frac{\text{irreversibilidades}}{\text{exergía consumida}}$$

$$\text{Ecuación 10: } IW = \frac{\text{exergía residuos}}{\text{exergía consumida}}$$

2.1.5.2 Análisis de Ciclo de Vida. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta de gestión medioambiental cuya finalidad es analizar de forma objetiva, metódica, sistemática y científica, el impacto ambiental originado por un proceso/producto durante su ciclo de vida completo, puede ser desde la cuna a la producción o de la cuna a la tumba (desde la adquisición de la materia prima hasta la gestión final del producto) (Jolliet et al., 2016, p.1). El análisis de ciclo de vida comprende 4 fases secuenciales e interrelacionadas, como lo establece la norma ISO 14040 (2006):

- Objetivos y alcance del estudio: en esta fase se expone la finalidad por la que se desarrolla el estudio y se establece el alcance donde se define la unidad funcional, amplitud, profundidad y el detalle de este.
- Análisis del inventario: una vez definida la primera fase, se realiza el inventario de los flujos elementales que constituye el consumo de recursos naturales y energía, así como el de emisiones con base en un volumen o unidad de masa.
- Análisis del impacto: en esta tercera parte, se relacionan las entradas y salidas seleccionadas en el inventario con los posibles impactos sobre el medio ambiente, la salud humana y la disponibilidad de recursos naturales, con el fin de clasificar, caracterizar y valorar la importancia de los impactos ambientales potenciales que se generan en el proceso, los cuales pueden ser expresados en unidades globales (eco puntos) utilizando la normalización de los datos. En esta fase, se emplea un método de evaluación para la transformación de los datos del inventario en resultados de carácter ambiental. Entre los métodos de evaluación con mayor aplicación para la estimación de impactos de suelo, procesos agrícolas, transporte y edificios se encuentra *EDIP 2003*, *Impact 2002+* y *TRACI* (Morozyuk et al., 2016, p.7).

El Método *Impact 2002+* proporciona la actualización y combinación de cuatro métodos como lo son, *Impact 2002*, *Eco-indicator 99*, *CML* y *IPCC*, aunque se basa en gran medida en el *Eco-indicator 99*. Por otra parte, considera cuatro categorías de impacto orientadas al daño como lo son: salud humana, calidad del ecosistema, cambio climático y recursos para la fase de la evaluación del impacto ambiental.

- Interpretación: el estudio termina con la combinación de la segunda y tercera fase, con el propósito de extraer las conclusiones y recomendaciones de acuerdo con el objetivo de estudio.

La evaluación del ciclo de vida incluye el balance de impactos ambientales a nivel de etapas, con la finalidad de conocer los impactos relacionados con las corrientes de procesos intermedios. El balance considera que la suma de la tasa de impactos ambientales del flujo de entrada $\dot{B}_{j,k,in}$ es igual a la asociada con los flujos de salida $\dot{B}_{j,k,out}$ en las etapas del proceso, como lo describe la Ecuación 11. El modelo ambiental introduce también el uso de ecuaciones auxiliares por etapa, obtenidas mediante los principios P y F, indicados por (Lazzaretto & Tsatsaronis, 2006, p.1262).

$$\text{Ecuación 11: } \sum_{j=1}^n \dot{B}_{j,k,in} = \sum_{j=1}^n \dot{B}_{j,k,out}$$

2.1.5.3 Evaluación Exergoambiental. Una vez realizado el análisis exergético y ambiental, de forma individual es necesario definir las variables exergoambientales con el propósito de evaluar el rendimiento ambiental del proceso. Meyer et al.,(2009) define cinco variables exergoambientales asociadas a los impactos ambientales de las corrientes de exergía de cada etapa del proceso (pp.80-81). En la Tabla 3 se presenta la definición de las variables exergoambientales, según lo indican las ecuaciones $\dot{B}_j = b_j \dot{E}_j (12-\Gamma_{b,k} = \frac{b_{P,k} - b_{F,k}}{b_{F,k}})$ (16.

Tabla 3. Variables exergoambientales del proceso

Variable	Fórmula	Definición
Tasa del impacto ambiental de la corriente j	$\dot{B}_j = b_j \dot{E}_j$ (12)	Definida como el producto del impacto ambiental específico de la corriente b_j (mPt/unidad de exergía) y la exergía de flujo \dot{E}_j .
Impacto ambiental específico de combustible	$b_{F,k} = \frac{\dot{B}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}}$ (13)	Relación entre la tasa de impacto ambiental del combustible y la exergía de combustible.
Impacto ambiental específico de producto	$b_{P,k} = \frac{\dot{B}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}}$ (14)	Relación entre la tasa de impacto ambiental del producto y la exergía de producto.
Tasa de impacto ambiental asociada con la destrucción de exergía.	$\dot{B}_{D,k} = b_{F,k} * \dot{E}_{D,k}$ (15)	Asociada como el producto del impacto ambiental específico del combustible y la exergía destruida
Diferencia relativa de impacto ambiental específico:	$r_{b,k} = \frac{b_{P,k} - b_{F,k}}{b_{F,k}}$ (16)	Definida como la relación entre la diferencia de los impactos ambientales específicas de producto-combustible y el de combustible.

Nota: adoptado de (Meyer et al.,2009, pp.80-81).

A partir de la estimación de las variables exergoambientales, es posible realizar el análisis individual de las etapas del proceso, identificando cuales de ellas tienen posibilidades de mejora, con la finalidad de mitigar los impactos ambientales generados por el proceso.

2.2 Marco de Antecedentes

En la actualidad el aceite Sacha inchi ha sido empleado con fines alimenticios. Sin embargo, estudios recientes han encontrado otras aplicaciones en la industria: en la producción de nanopartículas de oro (Kumar, Smita, Cumbal, & Debut, 2016, p.293), como bioabsorbente para la purificación del agua (Kumar, Smita, Sánchez, et al., 2016, p.55) y materia prima en la síntesis de resinas alquídicas (Flores et al., 2019, p.1801). Adicionalmente, en la producción de biodiésel debido a su alto contenido de ácidos grasos insaturados (cerca del 95%), lo que permite reducir la temperatura de cristalización en comparación con el biodiesel obtenido de la palma africana (Zuleta et al., 2012, p.96).

Las diversas técnicas de extracción de aceite Sacha inchi como el uso de solventes permiten obtener rendimientos diferentes del prensado en frío. De manera experimental, Follegatti-Romero et al., (2009,) comparó los resultados de la extracción supercrítica, la extracción Soxhlet convencional con hexano y la extracción por prensado en frío (p.323). En la primera usando CO₂ como solvente logró obtener un producto limpio con rendimiento del 50,1% del aceite contenido en las almendras, por debajo del valor de 54,3% obtenido por extracción con hexano y superior al 38,4% alcanzado por prensado en frío. Es importante mencionar, los aceites prensados en frío son aceites vegetales que presentan mayor estabilidad térmica y oxidativa en comparación con las

almendras prensadas con prensa de tornillo o el producido mediante el uso de solventes (Rawdkuen et al., 2016, pp.66-68).

Por otra parte, las corrientes intermedias del proceso de obtención de aceite Sacha inchi como la cáscara y estrella han sido objeto de varios estudios con fines energéticos. Lakkhana et al., (2017) utilizó la cáscara en procesos de gasificación obteniendo H_2 y CH_4 con un poder calorífico de $2,27 \text{ MJ/m}^3$ (p.870). De manera similar, Gonzalez(2016) reportó la producción de gas de síntesis de Sacha inchi con un PCI de $2,07 \text{ MJ/kg}$ (pp.97-99). Por otra parte, Osorio Martinez (2016) aprovechó las estrella y cáscara como biocombustibles en la fabricación de *pellets* y briquetas para hornos, estufas, calderas, etc (p.32).

Otro proceso termoquímico como la cogeneración ha sido utilizado en el aprovechamiento de material lignocelulósico de otras especies vegetales. En Colombia, se ha desarrollado cogeneración con biomasa en el sector azucarero y palmicultor(Fedebiocombustibles, 2010). En el año 2016, a partir de 6 millones de t de bagazo de caña de azúcar se generaron cerca de 1.4 GWh de energía eléctrica para autoconsumo y 515GWh se alimentó al Sistema Interconectado Nacional representando el 1% de la producción de electricidad en el país (Andi, 2018). Por otro lado en el año 2014, el aprovechamiento de 5.4 millones de racimos de fruta fresca de palma africana generaron 2,2 millones de t de biomasa y 119 millones m^3 de biogás; combustibles que se dispusieron para la producción de 40 MWh de electricidad (Briceño et al., 2015, p.45).

La torta prensada también es una corriente intermedia del procesamiento del aceite Sacha inchi, la cual una vez desengrasada, es fuente de proteínas (50% en peso) y aminoácidos esenciales, lo que la hace altamente deseable para uso industrial debido a sus productos de valor agregado como son los concentrados proteicos(Rawdkuen et al.,2016, p.64). Sathe et al., (2002) alcanzaron un

rendimiento de recuperación de 79,5% de proteínas (p.4096), mientras Aquino(2015) consiguió el 29% de aislamiento; utilizando el método de extracción alcalina adicionada con NaCl (pp.70-75). Por otra parte, en la investigación realizada por Aquino(2015), se revela rendimientos del 43% al utilizar métodos de extracción enzimática asistida; siendo estos procedimientos ecológicos y seguros(p.112). Adicionalmente, de acuerdo con Rawdkuen et al.,(2018), otro posible valor agregado son los hidrolizados de proteínas Sacha inchi que se absorben fácilmente en el cuerpo humano, los cuales se obtienen utilizando extractos de enzimas(pp.18-22).

Dado que existen investigaciones en análisis de ciclo de vida para especies vegetales con características similares a la Sacha inchi como los son los aceites de cocina (oliva y canela); se han citado en este estudio. Guarino et al.,(2019) evaluó los impactos ambientales de diferentes escenarios involucrando cultivos orgánicos y convencionales, y técnicas de extracción de aceite de Oliva en el Sur de Italia. Para dicha comparación eligió 0.75L de aceite extra virgen de oliva como unidad funcional, un alcance de la cuna a la producción de aceite y el método de evaluación ILCD Mid point2011. Encontrando impactos ambientales en todas las categorías evaluadas con una proporción variable entre el 80,6% en el caso del indicador de material particulado, hasta el 99,64% en el caso del uso del suelo. También se trazan impactos elevados para las etapas agrícolas entre todos los escenarios (70% -90% en todos los indicadores) causados por los fertilizantes. Entre las etapas de transformación, la producción de botellas es una de las fuentes más relevantes del ciclo de vida de energía y de impacto ambiental (80-90%) (pp.397-404).

En el mismo sentido Khanali et al., (2018) realizó el ACV del aceite de canola con la finalidad de evaluar los impactos ambientales de la cadena de producción desde el cultivo hasta el envase del aceite. Para el cual estableció 1 t de aceite de canola envasado en PET de 800 gramos. Los

resultados de acuerdo con el método CML-IA V3.01, mostraron que las actividades agrícolas son los factores más importantes en la generación de los impactos ambientales del proceso, superiores al 78%, mientras que lo restante se asigna a las etapas transformación y envase. Además, la categoría de impacto Ecotoxicidad Marina Acuática tiene la mayor carga ambiental en el proceso (92%), en el que la principal contribución está relacionada con el uso de fertilizantes de fosfato. Por otra parte, se emiten 3085,70 kg de CO₂ eq. a la atmósfera por producción de una tonelada de aceite comestible de canola envasado (pp-714-125).

También existen investigaciones basadas en la fusión de análisis exergético y ambiental relacionadas con la producción de aceites vegetales, como lo expuesto por Özilgen & Sorgüven (2011), en el que evaluó el consumo de energía y las emisiones de dióxido de carbono durante la producción de aceite de oliva, soya y girasol a través del indicador de eficiencia grado acumulativo de perfección (CDP). La estimación de CDP demostró que el requerimiento de diesel en el cultivo es la fuente dominante de consumo de energía y exergía del sistema de estudio, y emite la mayor parte de dióxido de carbono. Se alcanzaron reducciones en emisiones de CO₂ del 27%, 11% y 12% por t de aceitunas, semillas de girasol y soya respectivamente; con la disminución de consumo de diesel de 3860 MJ, 1847 MJ y 2347 MJ por t de semilla cosechada(pp.5954-5966).

Así mismo, se han evaluado sistemas de conversión de energía mediante un análisis exergoambiental. Tal como lo indica Cavalcanti et al., (2019) en la producción de energía térmica al utilizar biomasa de eucalipto como combustible. La estimación del indicador exergoambiental costo específico de exergía (SPECO) evidenció la caldera como el componente con mayor potencial de mejoramiento debido a que presenta las más altas tasas de impactos ambientales por destrucción de exergía, cuantificadas en 7,71 mPt/MJ. Un análisis de sensibilidad verificó el efecto

de la humedad de la biomasa de eucalipto en la eficiencia exergética de la caldera y en el impacto ambiental específico asociado con la energía, demostrando que a medida que la humedad del combustible se reduce del 48% al 5%, la eficiencia de la caldera aumentó del 21,86% al 47,43%, lo que disminuyó el impacto ambiental específico de 7715 a 5195 mPt/GJ (pp.1-9).

Del mismo modo, Restrepo, (2012) propuso una metodología de análisis exergoambiental con base en lo propuesto por Meyer et al., (2009) para comparar los impactos ambientales del proceso de generación termoeléctrica en dos escenarios, operando con el 100% de carbón y en combustión combinada con 30% de biomasa residual proveniente de cultivos de arroz . Para ello, dispuso de un factor exergoambiental, el cual mostró un 35% de mejora en el rendimiento ambiental cuando se utiliza biomasa con descomposición microbiana en la caldera, siendo el generador de vapor el que presenta mayor potencial de mejoramiento (pp.9-136).

También Donato,(2019) evaluó tres centrales termoeléctricas en Brasil conforme la metodología propuesta por Meyer et al., (2009) con la finalidad de cuantificar la reducción de los impactos ambientales utilizando centrales con tecnologías supercríticas e ultra supercríticas. Los resultados mostraron en ambos casos, la caldera como fuente principal de irreversibilidades del proceso mientras en el sistema de turbinas con mayores eficiencias exergéticas, resultado de las condiciones de vapor a altas presiones y temperaturas. En la configuración ultra supercrítica se alcanzó la mayor eficiencia exergética global de 41,54%, superior a 35,82% de la central subcrítica. Del mismo modo la generación de 1kWh de electricidad representó una disminución de impactos ambientales en 5,36 mPt como consecuencia de la reducción en 1,74 mPt relacionado con el flujo de agua de enfriamiento que pasa por la caldera (pp.126-162).

2.3 Análisis del Estado del Arte

Con la finalidad de tener un panorama más amplio de la Sacha inchi (*Plukenetia volubilis*) y su esquema de obtención de aceite Sacha inchi, se desarrolló un ejercicio de vigilancia tecnológica, empleando como herramienta la cienciometría de artículos científicos disponibles en la base de datos de Scopus (Elsevier B.V., 2020).

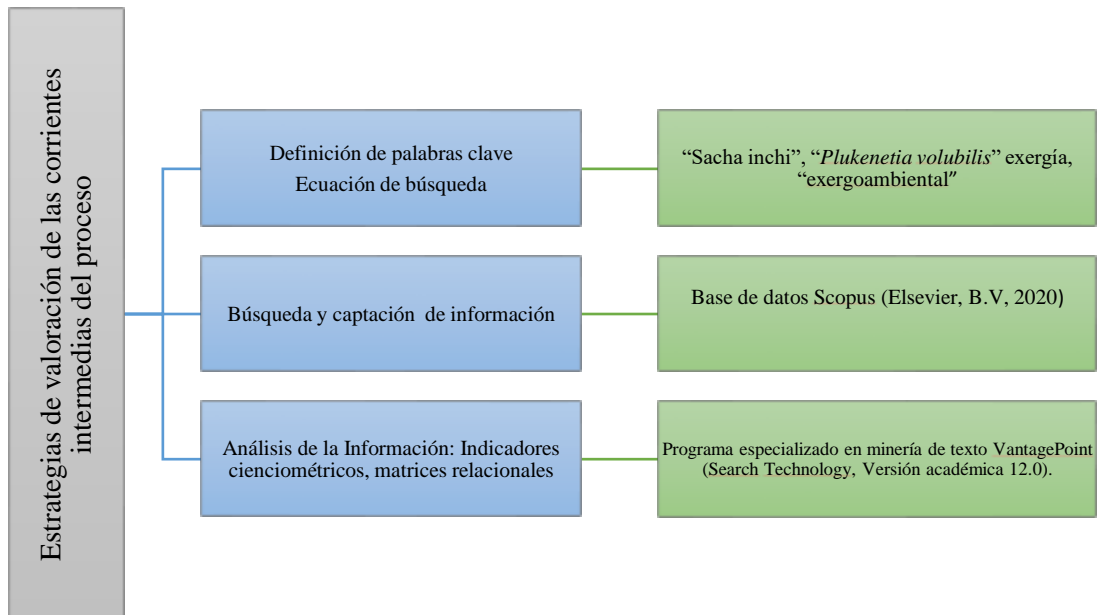
La vigilancia tecnológica se define como un proceso sistemático mediante cual se capta, analiza y difunde información de diversa índole económica, tecnológica, política, social, cultural, legislativa, mediante métodos legales, con el ánimo de identificar y anticipar oportunidades o riesgos, para mejorar la formulación y ejecución de la estrategia de las organizaciones. Dentro de las herramientas de la vigilancia tecnológica se encuentran la bibliometría y la cienciometría. La primera emplea las fuentes bibliográficas y patentes para identificar investigadores, sus relaciones y la tendencia para estudiar la organización de los sectores científicos y tecnológicos en un área determinada del conocimiento; en tanto que, la cienciometría se encarga de evaluar la actividad científica empleando indicadores numéricos de artículos o patentes según el caso (Cervantes & Garza, 2012, pp.43-45). Dentro de estos indicadores se tiene la medición de impacto de revistas e instituciones, países, análisis de áreas de interés con el fin de orientar la toma de decisiones. En la Tabla 4, se presentan los principales indicadores cienciométricos para artículos científicos.

Tabla 4. *Indicadores cuantitativos para artículos*

Indicadores cuantitativos de actividad científica	
Tipo de documento	artículos científicos
Bases de datos	Bases de datos tipo referenciales y de texto
Estructurar la ecuación de búsqueda	Palabras clave, buscar en los <i>keywords</i> , título y <i>abstract</i> del artículo, período de consulta
Número de documentos	Número de artículos
Dinámica de publicaciones	Número de artículos por años
Afiliación por país	Países donde trabajan los investigadores
Afiliaciones por institución	Organizaciones de tipo académico, privadas, gubernamentales, públicas
En qué tema	Área de conocimiento en la cual tiene su aplicación el trabajo de investigación.

Fuente: Unidad de Bibliometría – CRAI Biblioteca –USTABUCA, 2020.

En la Figura 4 se presenta el esquema metodológico que se desarrolló para esta etapa del trabajo de investigación relacionado con el aprovechamiento de la Sacha inchi y los análisis de exergía y exergoambiental de la producción del aceite de esta especie vegetal a nivel industrial.

Figura 4. Metodología seguida para la cienciaometría

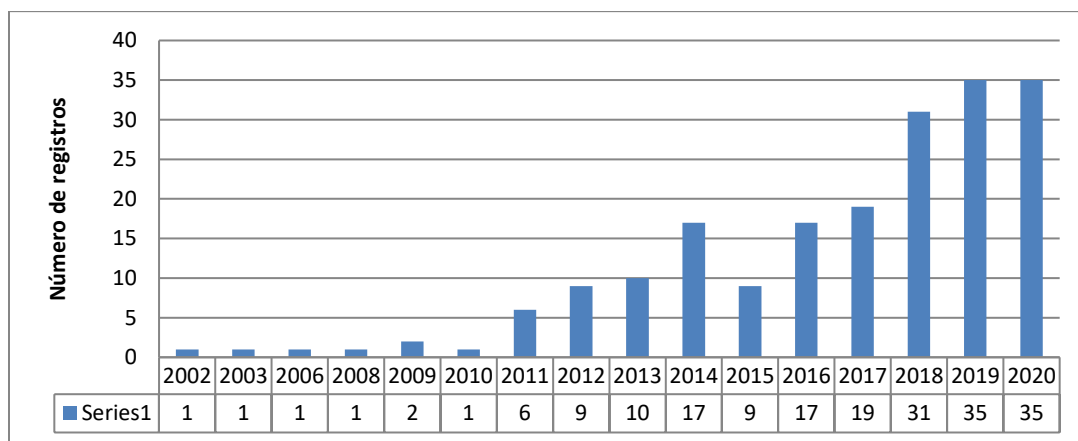
Se definieron como palabras clave “Sacha inchi”, “*Plukenetia volubilis*,” exergía, “exergoambiental con las cuales se estructuraron las ecuaciones de búsqueda de consulta en la base de datos de Scopus (Elsevier, B.V., 2020). Se obtuvieron indicadores cienciaométricos y matrices relacionales que permitieron definir las tendencias de investigación en este campo, empleando VantagePoint (*Search Technology*, Versión académica 12.0), disponible a través del CRAI - Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga. Este programa es especializado para realizar minería de textos (*Text mining*) y permite identificar dinámicas o tendencias como la evolución en el tiempo de las publicaciones, quiénes son los autores principales, los países e instituciones que mayor interés presentan por este tema y cuáles son las

aplicaciones más importantes a las que se orientan los trabajos de investigación a través de matrices relacionales entre grupos.

De acuerdo con las palabras clave definidas, se estructuraron varias ecuaciones de búsqueda con la finalidad de identificar las tendencias de investigación alrededor del proceso industrial de la obtención del aceite de Sacha inchi y el aprovechamiento de las corrientes intermedias generadas en este proceso.

La primera ecuación de búsqueda se definió de la siguiente manera: TITLE-ABS-KEY ("Plukenetia volubilis" OR "sacha inchi") AND DOCTYPE (ar), con la cual se recuperaron 197 artículos indexados en la base de datos de Scopus. En la Figura 5 se puede apreciar la distribución de las publicaciones por año. La producción científica aparece a partir de 2002, la cual es muy baja. Sin embargo, se observa un interés creciente a partir del 2011, siendo los años de mayor actividad 2019 y 2020 con 35 registros.

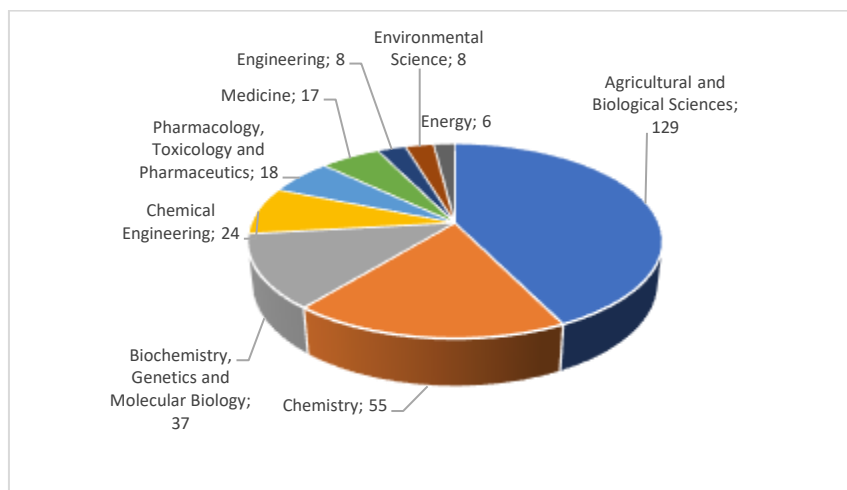
Figura 5. Distribución por año de artículos asociados con la investigación sobre Sacha inchi



Fuente: Unidad de Bibliometría del CRAI Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2020).

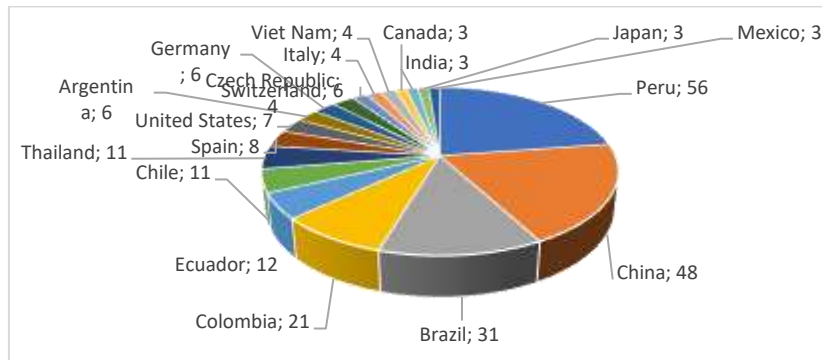
En la Figura 6, se presenta las áreas de aplicación en las cuales se han desarrollado los trabajos con esta especie vegetal. El mayor interés se presenta en agricultura y ciencias biológicas (129 registros), lo que indica que se estudian condiciones de cultivo de esta planta; Química (55), los trabajos se orientan a caracterización del aceite se Sacha inchi y estudio de las propiedades antioxidantes del mismo. Otras áreas de conocimiento son Bioquímica, genética y biología molecular (37) e Ingeniería Química (24), entre otros.

Figura 6. Distribución de artículos relacionados con Sacha inchi por área de conocimiento



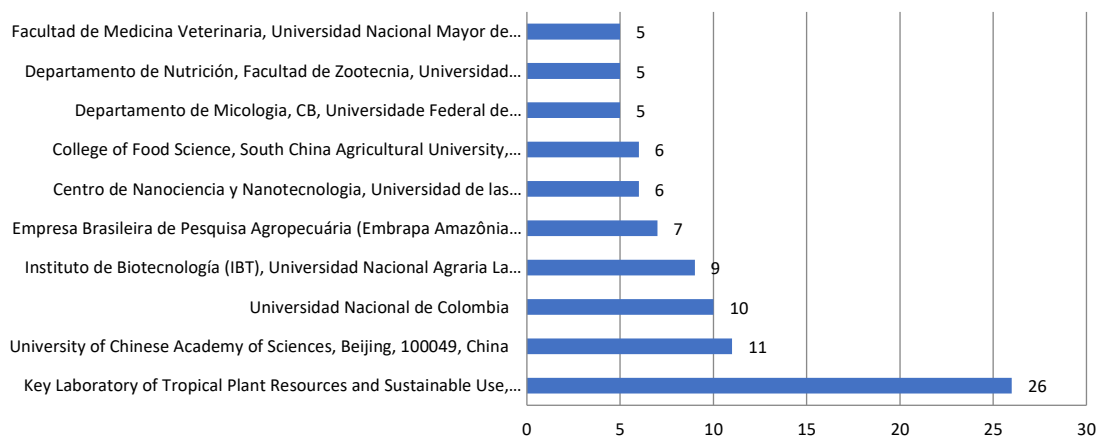
Fuente: Unidad de Bibliometría del CRAI Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2020) y analizados con el software de minería de textos *VantagePoint* (Licencia académica, versión 12, *Search Technology*).

En cuanto a la distribución por países a nivel mundial, Perú aparece en primer lugar con 56 registros, seguido por China con 48, Brasil con 31, Colombia con 21 y Ecuador con 12, dentro del grupo de los más importantes, como se aprecia en la Figura 7.

Figura 7. Distribución de artículos relacionados con Sacha inchi por países a nivel mundial

Fuente: Unidad de Bibliometría del CRAI Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2020) y analizados con el software de minería de textos *VantagePoint* (Licencia académica, versión 12, *Search Technology*).

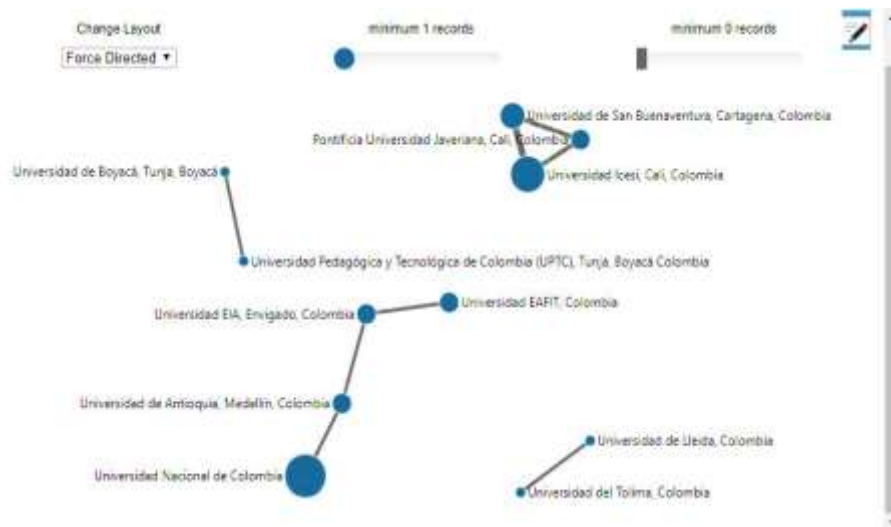
También se identificaron las instituciones a nivel mundial que han desarrollado los trabajos de investigación, las cuales se presentan en la Figura 8.

Figura 8. Distribución por instituciones de las publicaciones relacionadas con la Sacha inchi a nivel mundial

Fuente: Unidad de Bibliometría del CRAI Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2020) y analizados con el software de minería de textos *VantagePoint* (Licencia académica, versión 12, *Search Technology*).

En el caso de Colombia, se identificaron 21 registros, dentro de los cuales sobresalen las siguientes instituciones: Universidad Nacional de Colombia (10), Universidad Icesi (4), Universidad de San Buenaventura, Cartagena (3), Universidad de Antioquia, Medellín (2), Pontificia Universidad Javeriana, Cali, (2), existe trabajo colaborativo entre estas instituciones, como se presenta en la Figura 9.

Figura 9. Participación de instituciones en publicaciones relacionadas con la Sacha inchi a nivel nacional

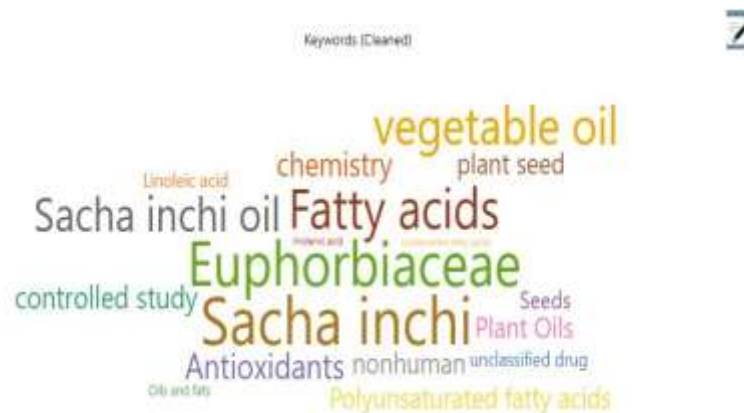


Fuente: Unidad de Bibliometría del CRAI Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2020) y analizados con el software de minería de textos VantagePoint (Licencia académica, versión)

Con la finalidad de identificar las temáticas de investigación que se desarrollan alrededor de la Sacha inchi, se identificaron las palabras clave más empleadas por los investigadores con más de 20 instancias o número de veces usadas. En la Figura 10, se puede observar que las palabras más importantes están asociadas a la planta como tal de Sacha inchi, estudio del aceite vegetal que se obtiene de la misma, contenido de ácidos grasos y ácidos grasos poliinsaturados, actividad

antioxidante, estudio de la semilla de la planta de la cual se obtiene el aceite vegetal y la aplicación de la química en el estudio de esta.

Figura 10. Palabras clave más empleadas por los autores como descriptores de la investigación relacionada con *Sacha inchi*



Fuente: Unidad de Bibliometría del CRAI Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2020) y analizados con el software de minería de textos VantagePoint (Licencia académica, versión 12, Search Technology).

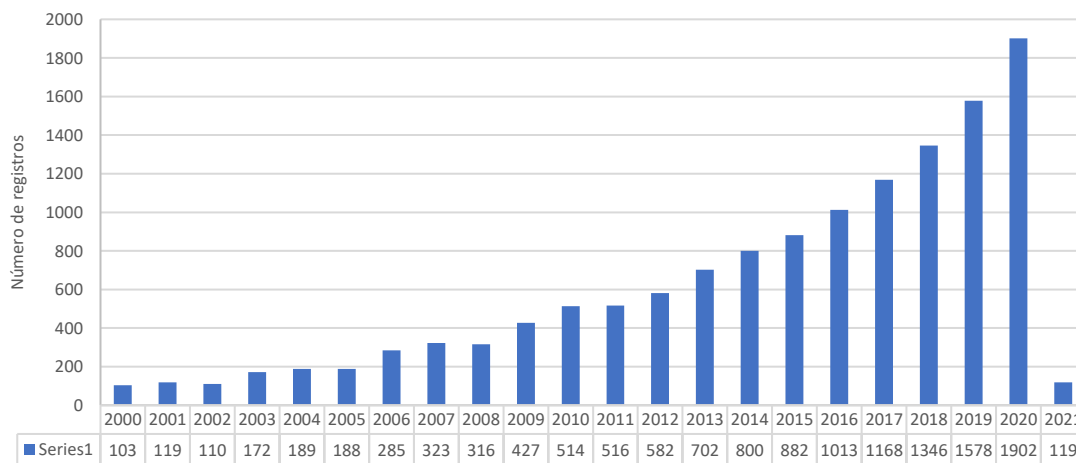
Como se puede observar con el análisis de las palabras clave en las publicaciones relacionadas con la Sacha inchi, todas se enfocan a la caracterización y estudio de las propiedades biológicas del aceite vegetal obtenido de esta especie vegetal. No hay referencias de artículos relacionados con evaluación de impacto ambiental o términos asociados con análisis exergo-ambiental o exergía.

Considerando lo anterior, se planteó una nueva ecuación de búsqueda para establecer la tendencia de investigación en el tema de análisis exergo-ambiental o exergía. La ecuación

estructurada fue la siguiente: TITLE-ABS-KEY (exergo-environmental OR exergy) AND DOCTYPE (ar) AND PUBYEAR > 1999, de la cual se obtuvieron 13,354 registros.

En la Figura 11, se presenta la distribución de publicaciones por año. Se puede observar una tendencia creciente en el interés de investigación en este tema de análisis exergo ambiental y exergía. El 2020 es el año de mayor actividad.

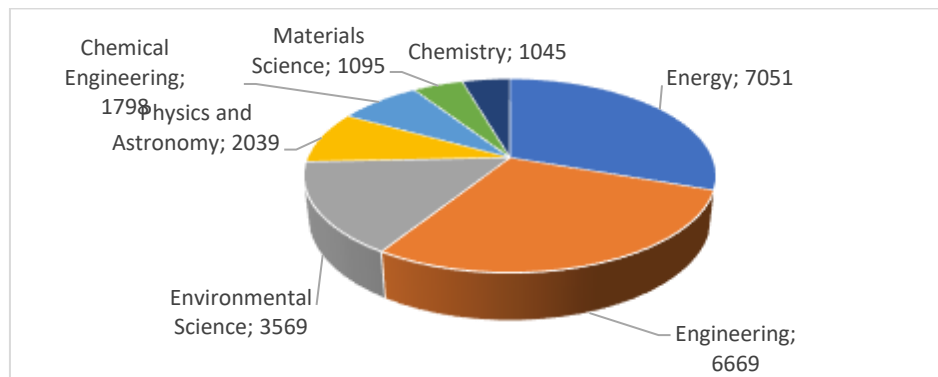
Figura 11. Distribución por año de artículos asociados con la investigación sobre análisis exergoambiental y exergía.



Fuente: Unidad de Bibliometría del CRAI Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2020) y analizados con el software de minería de textos VantagePoint (Licencia académica, versión 12, Search Technology).

La distribución de los trabajos con relación de las áreas de conocimiento se puede observar en la Figura 12. Energía es el sector de mayor aplicación de los trabajos de investigación con 7051 registros, seguido por Ingeniería con 6669, las Ciencias ambientales con 3569, dentro de las más importantes.

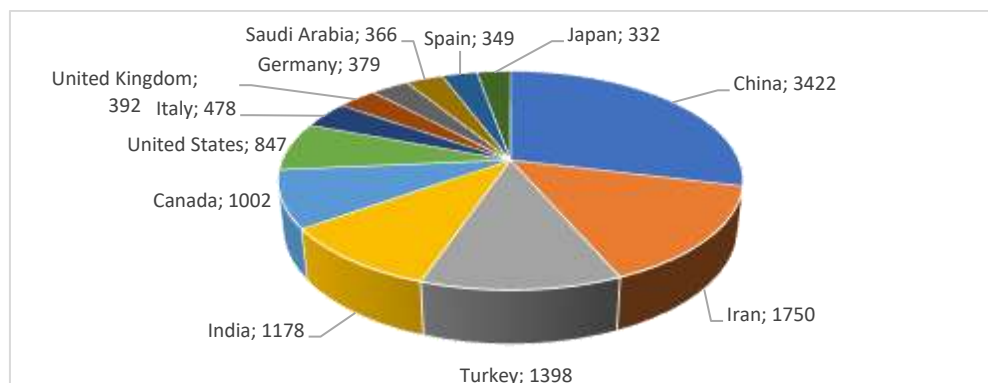
Figura 12. Distribución de artículos relacionados con análisis exergoambiental y exergía por área de conocimiento



Fuente: Unidad de Bibliometría del CRAI Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2020) y analizados con el software de minería de textos VantagePoint (Licencia académica, versión 12, Search Technology).

Los países a nivel mundial que más investigan sobre este tema son China (3422 registros), Irán (1750), Turquía (1398) e India con 1178, como se presenta en la Figura 13.

Figura 13. Distribución de artículos relacionados sobre análisis exergoambiental y exergía por países a nivel mundial

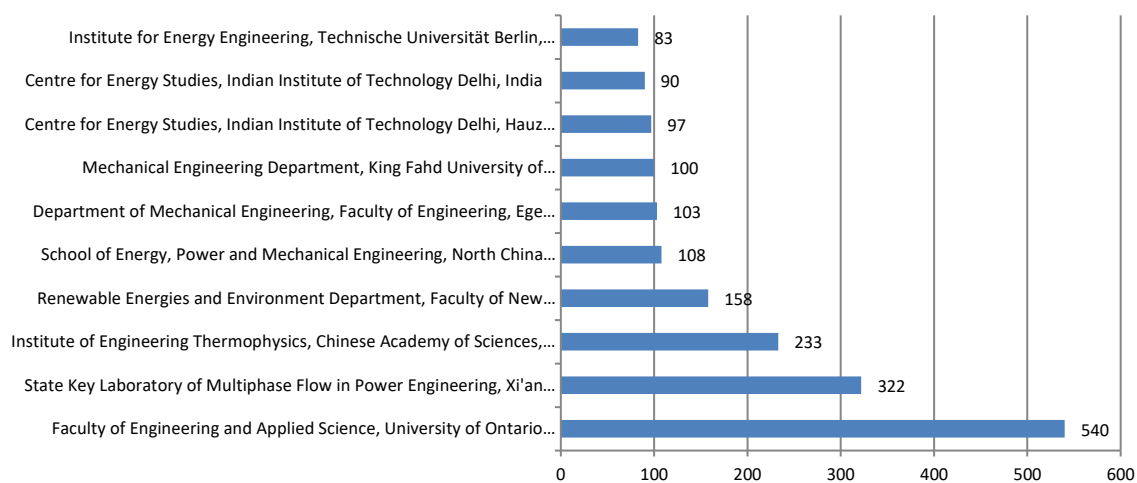


Fuente: Unidad de Bibliometría del CRAI Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2020) y analizados con el software de minería de textos VantagePoint (Licencia académica, versión 12, Search Technology).

A nivel latinoamericano, la investigación en este tema es pobre con un total de 609 publicaciones en total. Brasil aparece con 284 registros, seguido por Colombia con 124, México con 115, como los principales.

Se identificaron las principales instituciones a nivel mundial que se destacan por sus investigaciones en este tema, las cuales se presenta en la Figura 14.

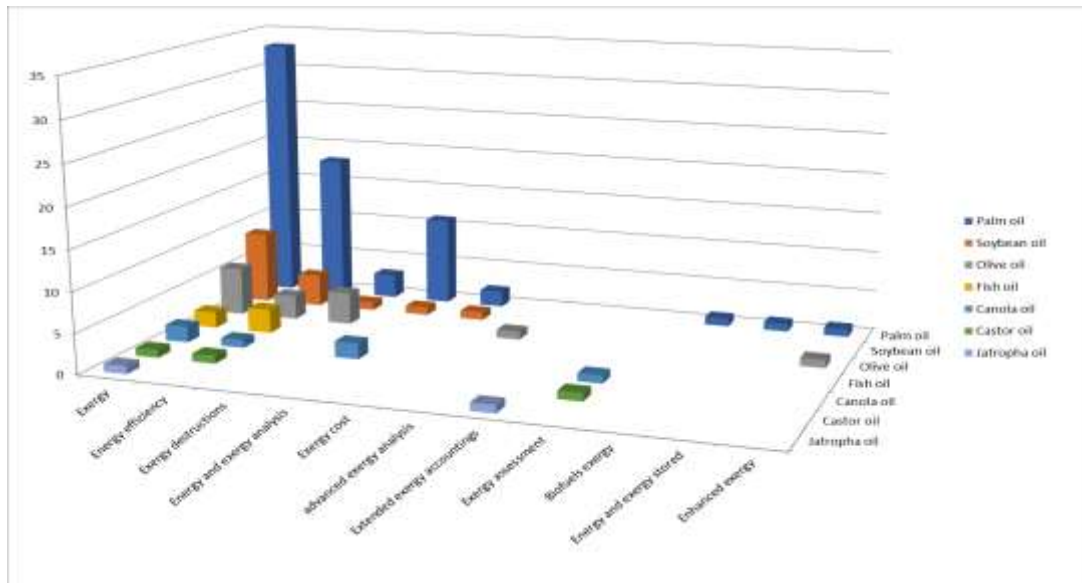
Figura 14. *Distribución por instituciones de las publicaciones relacionadas sobre análisis exergoambiental y exergía por países a nivel mundial*



Fuente: Unidad de Bibliometría del CRAI Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2020) y analizados con el software de minería de textos VantagePoint (Licencia académica, versión 12, Search Technology).

Con la finalidad de identificar las temáticas de investigación que se desarrollan alrededor de los análisis exergo ambiental y exergía se identificaron las palabras clave más empleadas por los investigadores con más de 500 instancias o número de veces usadas (Figura 15).

Figura 16. Matriz relacional de aceites vegetales más estudiados bajo el concepto de exergía y exergoambiental



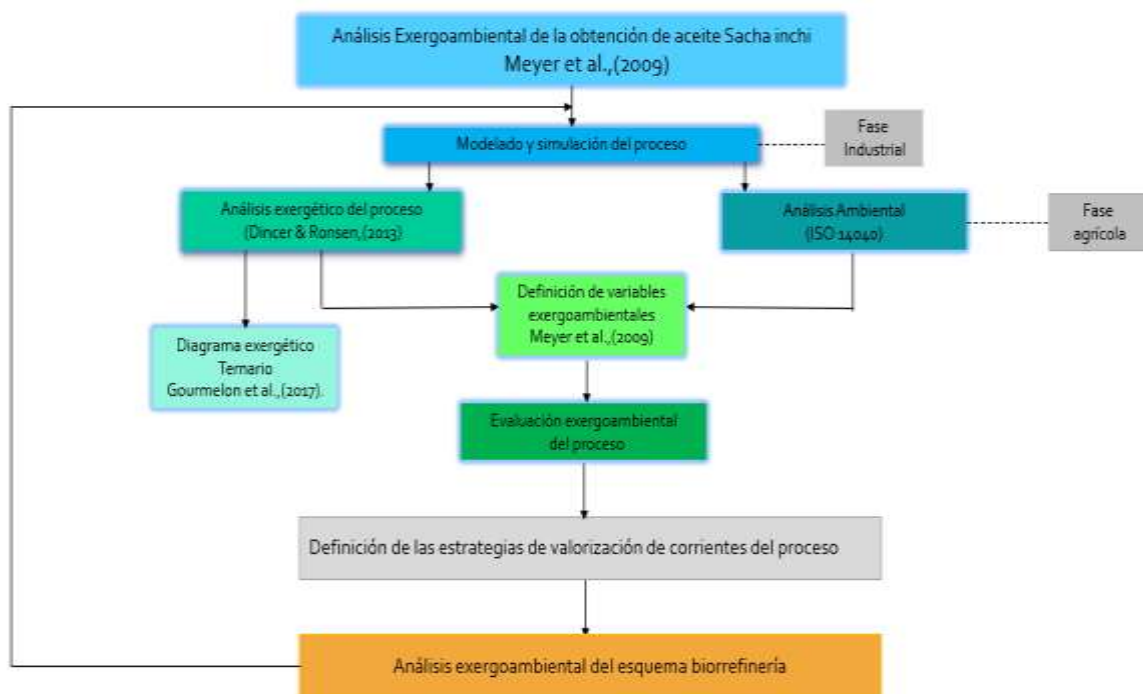
Fuente: Unidad de Bibliometría del CRAI Biblioteca de la Universidad Santo Tomás, Seccional Bucaramanga, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2020) y analizados con el software de minería de textos VantagePoint (Licencia académica, versión 12, Search Technology).

De acuerdo con la Figura 16, las publicaciones se enfocan principalmente en aceite de palma, seguido del oliva y canola. Las temáticas que se trabajan están direccionadas en el análisis energético y exergético del proceso de obtención aceite además de mejoras técnicas. También la producción de biocombustibles. Del mismo modo, la aplicación de diversas metodologías de exergía combinadas con términos económicos. No hay referencias de artículos relacionados de aceite Sacha inchi con evaluación con términos asociados con análisis exergo-ambiental o exergía.

3. Metodología

La metodología que se llevó a cabo consta de tres etapas fundamentales tal como se describe en la Figura 17. De acuerdo con la secuencia de la figura sugerida, inicia con el análisis exergoambiental del proceso caso base, el cual implica el análisis exergético y de ciclo de vida, además la fusión de dichos análisis con la estimación de variables exergoambientales. Seguidamente la definición de las estrategias de valorización de corrientes intermedias del proceso con base en los resultados de la etapa anterior. Termina con el análisis exergoambiental de las estrategias seleccionadas siguiendo la metodología del caso base.

Figura 17. Metodología seguida para el análisis exergoambiental



3.1 Análisis Exergoambiental del Proceso de Obtención de Aceite Caso Base

Para el análisis exergoambiental se siguió la metodología descrita por Meyer et al.,(2009) la cual consiste en tres pasos secuenciales; el análisis exergético, la evaluación del ciclo de vida y la evaluación exergoambiental con la estimación de las variables exergoambientales del proceso (p.77).

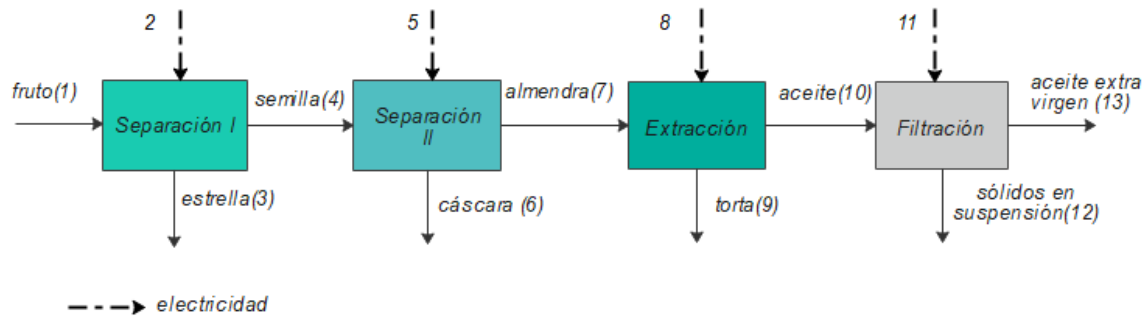
3.1.1 Análisis Exergético

Para el análisis exergético se tomó la metodología propuesta por Dincer & Ronsen,(2013) donde se definen tres etapas como se describe a continuación (pp.21-30):

3.1.1.1 Análisis del Proceso. El análisis se lleva a cabo mediante cuatro etapas.

1. Descripción del sistema: El sistema seleccionado para el análisis exergético fue el esquema de transformación en aceite Sacha inchi. El caso de estudio es una procesadora denominada OPTIMAL FOOD S.A.S, ubicada en la ciudad de Bucaramanga, la cual funciona como centro de acopio de fruto Sacha inchi para cultivos de la región, incluyendo el referente de este estudio.

El proceso consta de cuatro operaciones unitarias como se muestra en la Figura 18, en las etapas de separación I y II se realiza la remoción de las envolturas externas del fruto conocidas como estrella y cáscara; en la etapa de extracción se obtiene el aceite contenido en la almendra mediante la técnica de prensado en frío y éste se limpia a través de una filtración que permite la remoción de sólidos suspendidos. En el año 2019 bajo esta configuración se reporta la producción de 28800 litros de aceite Sacha inchi que son comercializados en el país.

Figura 18. Esquema de producción de la fase industrial del caso base

2. Análisis del proceso desde la perspectiva del volumen de control: Cada unidad del proceso (Figura 18): separación, separación II, extracción y filtración, se evaluaron como un volumen de control, con el propósito de identificar las corrientes de entrada y salida, junto con los productos y los residuos generados.
3. Definición del ambiente de referencia (AR): El ambiente de referencia se definió de acuerdo con los valores estándar de temperatura y presión ambiental de 25°C (298,15 Kelvin) y 101325 Pa (0,10 MPa). Estos valores son muy cercanos a la temperatura y presión atmosférica de 23°C y 89.726 Pa de la ciudad de Bucaramanga (IDEAM,2018).
4. Simulación del proceso: Con el objetivo de establecer propiedades termodinámicas como entalpía y entropía para los componentes y corrientes de proceso, se realizaron los balances de masa y energía, así como contabilizar la transferencia de energía del sistema con el ambiente de referencia en forma de calor y trabajo; se realizó la simulación del proceso utilizando la herramienta Aspen Plus v.10.4, en estado estacionario y teniendo en cuenta el paquete de fluido-termodinámico NTRL(Non-Rendón-Two-Liquid).

Se propuso como base de cálculo 100 kg/h de fruto de Sacha inchi. Las condiciones de operación, así como las relaciones de flujo reactivo/producto y el rendimiento fueron suministrados por la planta de procesamiento. La información relacionada con caracterización de corrientes se tomaron de un estudio experimental previo que se llevó a cabo en la Universidad Santo- Tomás, seccional Bucaramanga (Rodriguez,2020,pp.34-39) y lo reportado por (Ayala, 2016, p.48). En el Apéndice A se presentan la caracterización fisicoquímica de las corrientes del proceso.

3.1.1.2 Evaluación Exergética. Esta etapa se realizó de forma secuencial; el primer paso fue el cálculo de la exergía de corriente para cada volumen de control, teniendo en cuenta la Ecuación 1 Ecuación 4 y los valores teóricos de exergía química específica para cada componente tomados de (Cristóbal García-García et al., 2018, pp.513-518), (Szargut,2007,pp-1-8) y (Hosseini et al., 2015, pp.731-738).

Posteriormente se definieron la exergía de producto y combustible, en cada unidad de proceso o volumen de control, tal como se presenta en la Tabla 5. Cabe resaltar que las denotaciones para las corrientes que se presentan en dicha tabla están relacionadas con la Figura 18.

Tabla 5. *Exergía de producto y combustible del caso base*

Etapa	Exergía de combustible	Exergía de producto
Separación I	$\dot{E}_1 - \dot{E}_3$	$\dot{E}_4 - \dot{E}_2$
Separación II	$\dot{E}_4 - \dot{E}_6$	$\dot{E}_7 - \dot{E}_5$

Etapas	Exergía de combustible	Exergía de producto
Extracción	$\dot{E}_7 - \dot{E}_9$	$\dot{E}_{10} - \dot{E}_8$
Filtración	$\dot{E}_{10} - \dot{E}_{12}$	$\dot{E}_{13} - \dot{E}_{11}$

Seguidamente, se realizó un balance de exergía general del proceso y en cada volumen de control con el propósito de calcular las irreversibilidades tal como se plantea en la Ecuación 6 y se calcularon las eficiencias de etapas por medio de la ecuación Ecuación 7 y teniendo en cuenta el concepto de exergía de producto y combustible.

3.1.1.3 Diagrama Exergético Ternario del Proceso Caso Base. Con el fin de determinar los puntos a mejorar en el proceso se estimaron indicadores exergéticos correspondientes a eficiencia, irreversibilidad y desperdicios para cada etapa del proceso, los cuales fueron definidos en las ecuaciones Ecuación 8 Ecuación 10 de acuerdo con lo propuesto por (Gourmelon et al.,2017, p.306). De igual manera la interpretación de resultados de los indicadores se realizó con base en el diagrama ternario exergético.

3.1.2 Análisis de Ciclo de Vida

Para el análisis de ciclo de vida (ACV) se siguió la metodología de acuerdo con la norma NTC ISO14040(2006). A continuación, se describe el desarrollo metodológico del ACV.

3.1.2.1 Definición del Objetivo y Alcance del Estudio. Se estableció como objetivo la evaluación de los impactos generados en el proceso de producción de aceite de Sacha inchi desde

el cultivo hasta el envasado del aceite. Se eligió el alcance del cuna a la puerta, considerando tres subsistemas de estudio cultivo, producción y envase (de aceite) dentro de un tiempo referencial para el ACV de vida comprendido entre el periodo de noviembre del 2018 a marzo del 2020.

Los límites del sistema incluidos están relacionados con el transporte de semillas e insumos, la plantación del fruto Sacha inchi, transporte del fruto a la planta transformadora, los procesos que tienen lugar con la extracción y empaque del aceite, manufactura del empaque y su transporte a la planta. Se estableció como unidad funcional la producción de un litro de aceite de Sacha inchi. Como flujo de referencia; la unidad de masa en kilogramo, la energía eléctrica en kWh y el transporte en kg de diesel.

El propósito del alcance ACV fue establecido para analizar el potencial impacto ambiental asociado a: producción de energía eléctrica, consumo de ACPM (diésel) en transporte y maquinarias agrícolas, la producción y uso de compostaje y generación de biomasa considerados como residuos. Para el subsistema de cultivo, se tuvo en cuenta lo siguiente:

- El cambio de uso de suelo de tierras pastizales a tierras de cultivo; donde, el impacto generado por la absorción o emisión de dióxido de carbono es negativo. El procedimiento para su estimación se puede observar en el Anexo B.
- El requerimiento de 0.12L de diesel/km en una camioneta Pick Up para el transporte de semillas e insumos al cultivo. De igual forma, se incluyó el consumo 0.4L diesel/km para el traslado de la cosecha a la planta transformadora en una camioneta turbo, así como el transporte del material de envase para el aceite, desde el proveedor hasta la planta de procesamiento.

- El uso de microorganismos eficientes como fertilizante orgánico sin considerar las emisiones al suelo y al aire concernientes a su preparación.
- En cuanto a los abonos orgánicos, los componentes son fijados en el suelo y no hay pérdidas por volatilización o escorrentía.
- El consumo de agua fue despreciado debido al uso de agua de origen pluvial que se hace para el riego de los cultivos.

Con respecto al subsistema de producción se determinó excluir la emisión de material particulado durante la extracción, debido a que no fue posible cuantificarlo. Para el subsistema envase, se consideró la distancia de transporte (398 km) desde el proveedor de envase hasta la planta.

3.1.2.2 Análisis del Inventario. En la etapa cultivo, el inventario se construyó a partir de la información primaria recopilada en un cultivo ubicado en el municipio de Oiba, con 3.5 Hectáreas (Ha); precipitación anual de 2700 mm de agua, humedad relativa del 74% y temperatura promedio de 18°C (IDEAM, 2018), sin uso previo en actividades de siembra o ganadería, caracterizado por el manejo de prácticas de fertilización con abonos orgánicos elaborados en la zona de plantación. El estudio no contempló la caracterización fisicoquímica del suelo, dado que no se dispuso de la información. Para el año 2019 se reportó, una producción cercana a 10 toneladas de fruto Sacha inchi requiriendo cerca de 17,5 toneladas de fertilizante orgánico.

En la etapa de producción, se hizo uso de la información suministrada por la empresa y la proporcionada en la simulación del proceso en *Aspen Plus*. Además, se utilizaron datos secundarios de la base Ecoinvent versión 2.2 relacionados con la producción de compost, la

generación de electricidad tomando como referente la industria colombiana (mix energético), la combustión en maquinaria agrícola y la manufactura de las botellas.

Para las emisiones atmosféricas relacionadas con el uso de gasolina y diesel en la guadaña y el motocultor, se tuvo en cuenta el poder calorífico inferior de los combustibles 40,65MJ /Kg y 42,42 MJ/Kg respectivamente(FECOC, 2016). En lo concerniente al consumo de diesel por transporte se tomaron de acuerdo con lo expuesto por (Avila,2015) tal como se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Emisiones atmosféricas por consumo de 1 kg diesel por transporte

Sustancia	Valor	Unidad
Dióxido de carbono	0,88	kg
Monóxido de carbono	0,05	kg
Dióxido de azufre	0,11	kg
Metano	0,08	kg
Sustancia	Valor	Unidad
Óxidos nitrosos	0,15	kg
Partículas < 2,5 um	0,10	kg

Nota: Fuente, Avila Rojas(2015)

3.1.2.3 Evaluación de Impacto. La evaluación de los impactos ambientales se realizó en el software SimaPro 9.0 (SimaPro Faculty Temporary license Universidad Santo Tomás), utilizando el método Impact 2002+, dado que este método considera las categorías de impacto medio y final,

además proporciona la actualización de métodos de caracterización más utilizados (Jolliet et al., 2016, pp.130-131).

En función de los resultados obtenidos a partir de la simulación con el software *SimaPro*, se seleccionaron las categorías de impacto que tuvieron más relevancia en el sentido de la puntuación única, de manera que los resultados engloban los impactos ambientales de estudio en un indicador Pt (Point). Esta unidad equivale a la centésima parte de la carga ambiental anual de un ciudadano europeo medio, y permite evaluar los impactos ambientales expresados como un puntaje único (Jolliet et al., 2016). Las categorías de impacto medio, seleccionadas y analizadas en este estudio fueron cinco; no carcinogénicos, respiratorios inorgánicos, ecotoxicidad terrestre, calentamiento global y energía no renovable. Adicionalmente, se analizaron las categorías de impacto final para el sistema de estudio y se cuantificó el daño ambiental asociado al fruto y el consumo de electricidad para cada una de las etapas del proceso en unidades mPt.

Una vez se realizó el análisis de ciclo de vida y exergético de manera individual se formuló el balance de impacto ambiental de cada etapa tal como se propone en la Ecuación 11 y se presenta en la Tabla 7. Además se incluyen las ecuaciones auxiliares obtenidos a partir de principios F, teniendo en cuenta lo propuesto por (Lazzaretto & Tsatsaronis, 2006, p.1262), en cuanto que se formularon para flujos que suministran exergía y por tanto la disminución de exergía dentro de esta etapa es parte de la exergía de combustible Cabe señalar que se utilizaron las denotaciones para las corrientes de acuerdo con la Figura 18.

Tabla 7. *Asignación de los impactos ambientales a corrientes de exergía del proceso caso base*

Etapas	Balance de impacto ambiental	Ecuaciones F
Separación I	$b_1\dot{E}_1 + b_2\dot{E}_2 = b_3\dot{E}_3 + b_4\dot{E}_4$	$b_1 = b_3$
Separación II	$b_4\dot{E}_4 + b_5\dot{E}_5 = b_6\dot{E}_6 + b_7\dot{E}_7$	$b_4 = b_6$
Extracción	$b_7\dot{E}_7 + b_8\dot{E}_8 = b_9\dot{E}_9 + b_{10}\dot{E}_{10}$	$b_7 = b_9$
Filtración	$b_{10}\dot{E}_{10} + b_{11}\dot{E}_{11} = b_{12}\dot{E}_{12} + b_{13}\dot{E}_{13}$	$b_{10} = b_{12}$

Se debe agregar que en el balance de impactos ambientales tal como se presenta en la Tabla 7, no considera la carga ambiental relacionada con la construcción, operación y disposición de los equipos del proceso, dado que sus valores son pequeños al considerarse la vida útil de los equipos.

3.1.3 Evaluación Exergoambiental

El rendimiento ambiental del proceso se evaluó teniendo en cuenta la estimación y el análisis de las variables exergoambientales indicadas en las ecuaciones $\dot{B}_j = b_j \dot{E}_j$ ($r_{b,k} = \frac{b_{P,k} - b_{F,k}}{b_{F,k}}$) (16) para las etapas, además la interconexión entre ellas para el proceso de obtención de aceite Sacha inchi.

3.2 Definición de Estrategias de Valoración de las Corrientes Intermedias del Proceso

Considerando los resultados del análisis exergoambiental del caso base, se propusieron estrategias de valorización de corrientes intermedias del proceso obtención de aceite con tecnologías de procesamiento aplicadas a la conversión de biomasa que presentan características (poder calorífico y contenido de proteína) similares al material considerado residuo en el caso base.

Una vez se incluyeron las etapas cogeneración y aislamiento proteico como estrategias de valorización de corrientes del esquema de obtención de aceite se analizó el proceso productivo bajo concepto de biorrefinería de acuerdo con la metodología propuesta en la sección 3.1 para el caso base.

3.3 Análisis Exergoambiental de las Estrategias de Valorización del Proceso de Obtención de Aceite Sacha Inchi

Para la descripción de la etapa cogeneración, se tomó la configuración tecnológica propuesta por (Palacios-Bereche & Nebra, 2009, pp.1-9) a partir de bagazo de caña de azúcar teniendo en cuenta la prevalencia de producción de electricidad sobre la térmica, la cual es un ciclo de vapor de agua con turbina de extracción-condensación. Con respecto a la etapa aislamiento proteico se tomaron datos experimentales reportados por (Rodríguez,2020, pp.39-47), en donde la materia prima procesada fue suministrada de la procesadora del estudio de caso.

Una vez fueron simuladas la cogeneración y el aislamiento proteico en Aspen Plus se estimaron las propiedades energéticas y las exergías de corriente, trabajo y calor de cada etapa como un volumen de control. Para el modelado, los componentes NaCl, C₆H₁₂, C₂H₄O₂, C₂H₅OH, O₂, N₂ y CO₂ que se incluyeron en la biorrefinería, se definieron en componentes convencionales.

Seguidamente se calcularon las irreversibilidades de acuerdo con la Ecuación 6 y también la eficiencia exergética de cada etapa; en la cogeneración se determinó como la relación entre la energía eléctrica entregada por el turbogenerador y el calor generado en la caldera mientras en la etapa aislamiento teniendo en cuenta la definición de exergía de producto y combustible tal como lo presenta la Tabla 8. Y se terminó el análisis exergético con la realización del diagrama ternario

exergético en donde se evaluaron las etapas de la obtención del aceite con sus estrategias de valorización propuestas dentro del esquema biorrefinería. Cabe señalar que las denominaciones para las corrientes que se presentan en dicha tabla están relacionadas con el esquema biorrefinería de la Figura 28.

Tabla 8. *Exergía de producto y combustible de las estrategias de valorización propuestas del esquema de obtención de aceite Sacha inchi*

Etapa	Exergía de combustible	Exergía de producto
Cogeneración	$\dot{E}_{14} - \dot{E}_{16} - \dot{E}_{17}$	\dot{E}_{19}
Aislamiento proteico	$\dot{E}_9 + \dot{E}_{20} + \dot{E}_{21} + \dot{E}_{23} + \dot{E}_{24} -$ $\dot{E}_{25} - \dot{E}_{26} - \dot{E}_{27}$	$\dot{E}_{28} - \dot{E}_{22}$

Una vez se realizó el análisis exergético, se evaluaron los impactos ambientales del ciclo de vida del aceite, donde se consideraron los subprocesos: cultivo, producción, envase, cogeneración y aislamiento proteico. La inclusión de las estrategias, hicieron parte del subsistema producción, y en esta nueva definición, la producción está asociada con el consumo de electricidad procedente de la red mientras la cogeneración al aprovechamiento energético en la obtención del aceite. En la etapa aislamiento, la cual implicó inicialmente la remoción del aceite contenido en la torta por extracción de solventes, se consideró la recirculación del hexano como una estrategia de recuperación en el proceso.

Dado que el ACV cuantificó la carga ambiental de los flujos de entrada del proceso, adicionalmente fue necesario la formulación del balance de impactos ambientales de las etapas cogeneración, aislamiento proteico y la extracción puesto que involucra consumo de electricidad de la red de distribución nacional, tal como se propone en la Ecuación 11 y se presentan en la Tabla 9; con la finalidad de conocer los impactos relacionados con las corrientes de procesos intermedios y las estrategias de valorización.

Además implicó la definición de ecuaciones auxiliares obtenidos a partir de principios F tal como lo propone (Lazzaretto & Tsatsaronis, 2006, p.1262), las cuales hacen referencia a la disminución de exergía de una corriente exergética dentro de la unidad de proceso y la diferencia de exergía entre la entrada y la salida es definida como la de combustible.

Tabla 9. Asignación de los impactos ambientales a corrientes de exergía del esquema biorrefinería

Etapa	Balance de impactos ambientales	Ecuaciones F
Extracción	$b_7\dot{E}_7 + b_{8'}\dot{E}_{8'} + b_8\dot{E}_8 = b_9\dot{E}_9 + b_{10}\dot{E}_{10}$	$b_7 = b_9 ; b_{8'} = b_{19}$
Cogeneración	$b_{14}\dot{E}_{14} = b_{16}\dot{E}_{16} + b_{17}\dot{E}_{17} + b_{19}\dot{E}_{19}$	$b_{14} = \frac{B_3+B_6}{E_3+E_6} ; b_{14} = b_{16} ; b_{14} = b_{17}$ $b_2 = b_{19} ; b_5 = b_{19} ; b_{11} = b_{19}$
Aislamiento Proteico	$b_9\dot{E}_9 + b_{20}\dot{E}_{20} + b_{21}\dot{E}_{21} + b_{22}\dot{E}_{22}$ $+ b_{23}\dot{E}_{23} + b_{24}\dot{E}_{24}$ $= b_{25}\dot{E}_{25} + b_{26}\dot{E}_{26}$ $+ b_{27}\dot{E}_{27} + b_{28}\dot{E}_{28}$	$b_{20} = b_{25}$ $b_{26} = \frac{B_9 + B_{20} - B_{25}}{E_{A-1}}$ $b_{28} = \frac{B_9 + B_{20} + B_{21} + B_{22} - B_{25} - B_{26}}{E_{A-4}}$

Nota: E_{A-1} y E_{A-4} son exergías de corrientes intermedias del proceso del aislamiento proteico (Figura 31) y sus valores son 0,186 y 0,073 GJ/h respectivamente

Cabe resaltar que en el esquema de estudio no se consideraron los impactos ambientales relacionados con la construcción, operación y disposición de los equipos involucrados en las etapas, dado que su estimación está basada en el tiempo de vida útil de los componentes.

Tras el análisis exergético y ambiental por individual, se evaluó el rendimiento ambiental del proceso teniendo en cuenta la estimación y el análisis de las variables exergoambientales indicadas en las ecuaciones $\dot{B}_j = b_j \dot{E}_j$ ($12r_{b,k} = \frac{b_{P,k} - b_{F,k}}{b_{F,k}}$) (16) para las etapas separación I, separación II, cogeneración, aislamiento proteico y filtración, además la interconexión entre ellas para el proceso de obtención de aceite Sacha inchi.

4. Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en esta investigación, así como la discusión de los mismos con diferentes trabajos reportados en la literatura.

4.1 Análisis Exergoambiental del Proceso Obtención de Aceite Sacha Inchi Caso Base

Los resultados obtenidos del análisis exergético se muestran a continuación, de acuerdo con la metodología descrita por (Dincer & Ronsen, 2013, pp.21-30).

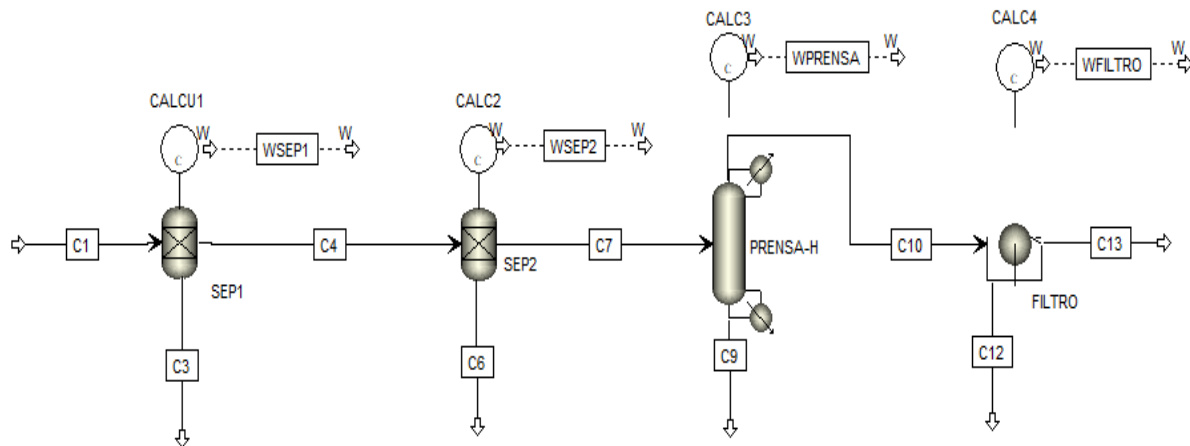
4.1.1 Análisis Exergético

Tal como se describió en la metodología el primer paso para el análisis exergético fue la definición del volumen de control del esquema propuesto en la Figura 18. Seguido de una simulación en estado estable la cual permitió calcular los balances de masa, energía y propiedades termodinámicas como entropía y entalpia de las corrientes del proceso.

4.1.1.1 Simulación del Proceso. Las etapas del proceso fueron modeladas, utilizando Aspen Plus versión 10.4 tal como se muestra en la Figura 19. Para las unidades de separación de las capas externas del fruto denominadas estrella y cáscara, se utilizaron separadores genéricos especificando la relación de reparto de los componentes hacia las corrientes de salida. Para la extracción del aceite: un separador considerando la pureza de una de las dos corrientes de salida. Por último, se empleó un separador líquido-sólido con un sistema de filtración por presión.

En el diagrama de proceso, que se muestra en la Figura 19, se identifican cuatro corrientes de entrada en cada una de las etapas: fruto (C1), semilla (C4), almendra (C7), aceite extraído(C10) y cinco corrientes de salida: estrella(C3), cáscara (C6), torta (C9), sólidos suspendidos(C12) y aceite extra virgen(C13) siendo ésta última el producto final.

Figura 19. Simulación del proceso de extracción de aceite



Adoptado de Aspen Plus versión 10.4

Los requerimientos energéticos asociados al trabajo en cada equipo se especificaron teniendo en cuenta rendimientos y eficiencias de los equipos existentes en la procesadora OPTIMAL FOOD S.A.S, ubicada en la ciudad de Bucaramanga.

Como resultados de la simulación se alcanzó la producción cerca de 16 litros aceite Sacha inchi ($\rho = 0,9 \text{ kg/L}$) a partir de 100 kg fruto Sacha inchi que ingresan al proceso, equivalente a un rendimiento global de 63%, superior al 43% reportado por (Ayala,2016, p.47), quien utiliza la misma variedad de semilla y tecnología de extracción. Por otro lado, las cuatro corrientes de salida restantes, C3, C6, C9 y C12, quedan disponibles al ambiente. Las cuales constituyen el 85% del peso del fruto de Sacha inchi.

A continuación, en la Tabla 10, se presenta el balance de masa, así como las propiedades energéticas para las corrientes principales involucradas en la obtención de aceite, teniendo en cuenta el paquete de fluido-termodinámico NTRL(Non-Rendón-Two-Liquid). También se presentan los requerimientos energéticos por cada etapa del proceso. Con respecto a las condiciones de operación de temperatura y presión correspondieron a las referentes de manera estándar de 25°C (298,15 Kelvin) y 101.325 Pa (0,10 MPa) respectivamente.

Tabla 10. Principales corrientes y requerimientos energéticos del proceso caso base

Compuestos	C1	C3	C6	C9	C12	C13
Flujo másico (kg/h)	100	47,5	18,39	19,44	0,32	14,34
Composición (%m/m)						
Triglicéridos (MIXED)*	20,22	0,40	0,40	32,83	0	94,65
Fibra (CIPSD)**	51,5	76,50	76,49	5,70	16,10	0
Proteína (CISPD)	13,1	5,60	5,60	47,20	85,28	0

Compuestos		C1	C3	C6	C9	C12	C13
Otros (MIXED)		15,08	17,50	17,50	14,28	0	5,37
Propiedades Energéticas							
		-	-	-	-	-	-
h	kJ/h	631992,75	343541,17	132994,91	120674,08	2332,67	32449,91
S	kJ/kg-K	-16,16	-20,99	-20,99	-7,68	-10,27	-5,64
Requerimiento energético por etapas kJ/h							
Separación I		5651,62					
Separación II		1698,04					
Extracción		262144,02					
Filtración		349,52					

Nota: *MIXED: Fase líquida **CISPD: Fase sólida

De acuerdo con la Tabla 10, para las corrientes de salida del proceso, la estrella (C3, 48kg/ 100 kg de fruto) y cáscara (C6, 18 kg/100 kg de fruto), muestran un alto contenido de material lignocelulósico cerca del 77% en masa, que puede ser aprovechado en diferentes usos, por ejemplo, como material absorbente, fertilizante o energía. Para la corriente asignada torta (C9, 19 kg/100 kg de fruto), se evidencia la presencia de proteína (composición del 47% en masa) que puede ser valorizada como ingrediente en suplementos alimenticios. En cuanto al aceite (C13, 14 kg/100 kg de fruto), su composición de ácidos grasos del 95%, hacen de este producto una fuente vegetal en la dieta alimentaria.

4.1.1.2 Evaluación Exergética. Una vez se realizó el balance de masa del proceso y se calcularon las propiedades energéticas de las corrientes del proceso y los consumos energéticos de los equipos, a partir de estos valores, se estimaron las exergías de corriente y trabajo de acuerdo con las Ecuación 1 Ecuación 2 Ecuación 4 respectivamente para cada etapa del proceso, en donde fueron caracterizadas en exergías de combustible y producto tal como se propuso en la Tabla 5.

En el Apéndice C se presenta los valores de las exergías químicas específicas de los componentes utilizados en la simulación en Aspen Plus. Con base en estos resultados y la finalidad de la evaluación exergética, se cuantificó las irreversibilidades de acuerdo con la Ecuación 6 y la eficiencia exergética por etapa según lo indica la Ecuación 7.

Tal como se describió en la metodología, la evaluación exergética se realizó a cada unidad de proceso. En la primera separación, tal como se da a conocer en la Tabla 11, las exergías de corrientes en cuanto al componente físico son nulas debido a que las condiciones de temperatura y presión del proceso correspondieron a las del ambiente de referencia. De manera semejante, ocurre con las exergías de corriente en las demás etapas del proceso. Adicionalmente, en la misma tabla se presenta la exergía de combustible y producto, cuya diferencia entre sus valores corresponden a la destrucción exergética de la etapa.

Tabla 11. Evaluación exergética de la primera separación del proceso caso base

Exergía de corriente (MJ/h)		Exergía de trabajo (MJ/h)		
Corriente	Ex_f	Ex_q	Ex_w	
C1	0	2462,15	C2	5,65
C3	0	1070,50		
C4	0	1391,95		
Exergía de combustible (MJ/h)		1391,65		
Exergía de producto (MJ/h)		1386,29		
Variables exergéticas				
E_D (MJ/h)		5,36		
ϵ_k (%)		99,78%		

Nota. E_D . destrucción de exergía ϵ_k . eficiencia exergética

Para la corriente C1 de entrada a la etapa y al proceso global, su contenido exergético está cerca de 2462,15 MJ/h, del cual el 43% sigue en el proceso como producto (C4) al estar interconectada con la etapa siguiente y el restante, el 57% queda disponible al ambiente (C3). Por otro lado, se contabilizaron cerca de 5,36 MJ/h en irreversibilidades, las cuales están relacionadas con el trabajo eléctrico del equipo. En cuanto la eficiencia exergética, su valor es alto, lo que muestra un grado de aprovechamiento de los recursos exergéticos suministrados en la etapa.

Continuando con la segunda separación, en la Tabla 12 se muestran las exergías de corriente y de trabajo para esta etapa, al igual que las de combustible y producto. La disminución del contenido exergético de la semilla (C4) dentro de la unidad de operación se definió como exergía de combustible. Mientras la exergía de producto se caracterizó por la diferencia del contenido exergético entre la corriente (C7); materia que se aprovecha en la etapa siguiente y el relacionado con el consumo de electricidad (C5) en el equipo.

Tabla 12. Evaluación exergética de la segunda separación del proceso caso base

Exergía de corriente (MJ/h)		Exergía de trabajo (MJ/h)		
Corriente	Ex_f	Ex_q	Ex_w	
C4	0	1391,95	C5	1,70
C6	0	414,42		
C7	0	977,88		
Exergía de combustible (MJ/h)		977,53		
Exergía de producto (MJ/h)		976,18		
Variables exergéticas				
E_D (MJ/h)		1,34		
ϵ_k (%)		99,9%		

Nota. E_D destrucción de exergía ϵ_k eficiencia exergética

La cáscara (C6) presenta 414,42MJ/h de contenido exergético, el cual representa el 30% de la exergía de la corriente C4 que ingresa a la etapa y es destinada hacia al ambiente sin aprovechamiento alguno en el proceso de estudio. De otra parte, con respecto a la destrucción de exergía se alcanzan magnitudes de 1,34 MJ/h asociadas también con el requerimiento energético, pero inferiores a la primera separación. Así mismo, un valor más alto de eficiencia exergética muestra un mayor aprovechamiento de los recursos suministrados a la etapa.

Siguiendo con la evaluación exergética en la etapa de extracción, en la Tabla 13 se muestran las exergías de corrientes de entrada almendra C7 y de salida: torta C9 y aceite C10. Además del consumo energético C8 por la prensa para extraer el aceite de la almendra y las exergías de combustible y producto cuantificadas en 547,12 y 285 MJ/h respectivamente, donde su relación muestra la eficiencia exergética de la etapa.

Tabla 13. Evaluación exergética de la etapa extracción del proceso caso base

Corriente	Exergía de corriente (MJ/h)		Exergía de trabajo (MJ/h)	
	Ex_f	Ex_q	C8	Ex_w
C7	0	977,88	C8	262,14
C9	0	430,76		
C10	0	547,21		
Exergía de combustible (MJ/h)		547,12		
Exergía de producto (MJ/h)		285,07		
Variables exergéticas				
E_D (MJ/h)		262,05		
ϵ_k (%)		52,10%		

Nota. E_D destrucción de exergía ϵ_k eficiencia exergética

Los resultados obtenidos evidencian un bajo contenido exergético para el aceite C10 de 547,12 MJ/h, siendo este la materia prima que ingresa a la etapa siguiente, además el 44% de la exergía contenida en almendra C7 se está entregando al ambiente en la torta C9. También se identificaron irreversibilidades de 262,14 MJ/h y un valor bajo de eficiencia exergética del 52,10% tal como se presenta en la Tabla 13, lo cual se sustenta en el bajo contenido exergético del aceite (C10) y el requerimiento de energía del equipo (C8). La destrucción de exergía en esta etapa considera el 97% de irreversibilidades del proceso de obtención de aceite.

Ahora bien, la Tabla 14 da a conocer la evaluación exergética de la última etapa del proceso. La exergía de corriente C13 en 977,88 MJ/h que ha pasado por un proceso de purificación se presenta como producto final del esquema de procesamiento. Lo cual corresponde en un 22% de la exergía contenida del fruto Sacha inchi que ingresó como materia prima al proceso global.

Tabla 14. Evaluación exergética de la etapa filtración caso base

Corriente	Exergía de corriente (MJ/h)		Exergía de trabajo (MJ/h)	
	Ex_f	Ex_q		Ex_w
C10	0	547,21	C11	0,35
C12	0	414,42		
C13	0	977,88		
Exergía de combustible (MJ/h)		541,87		
Exergía de producto (MJ/h)		541,56		
Variables exergéticas				
E_D (MJ/h)		0,32		
ϵ_k (%)		99,94%		

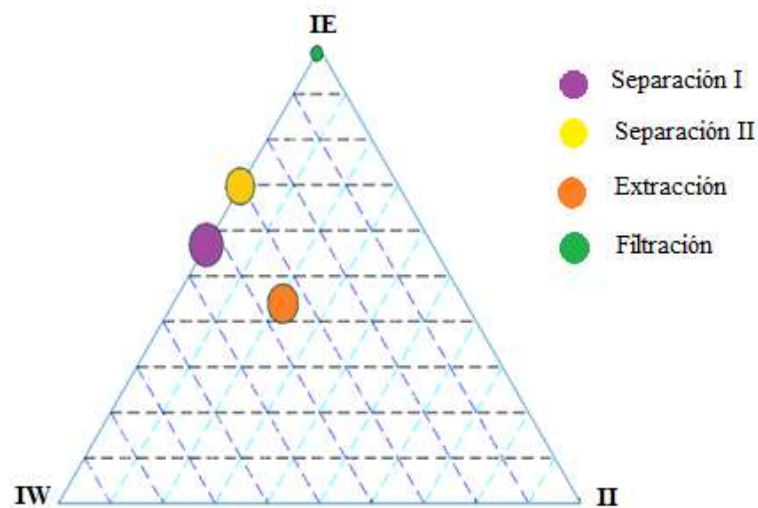
Por otro lado, de acuerdo con la Tabla 14, en la filtración se cuantificaron irreversibilidades alcanzando valores de 0,32 MJ/h, siendo esta la etapa con menor destrucción de exergía del esquema global debido al bajo requerimiento energético del equipo. Esto lleva a decir que hubo un aprovechamiento de los recursos exergéticos suministrados a la etapa, lo cual se refleja en el valor de la eficiencia exergética.

4.1.1.3 Diagrama Exergético Ternario para el Proceso Caso Base. Una vez se realizó la evaluación exergética, con la finalidad de proponer mejoras técnicas al proceso, se representó el diagrama exergético ternario del proceso de acuerdo con lo propuesto por (Gourmelon et al., 2017, p.306), en donde se establecieron tres indicadores exergéticos tal como se indican en las ecuaciones Ecuación 8 Ecuación 10 El primero, IE está relacionado con la eficiencia exergética de la etapa, el segundo IW con las corrientes que quedan disponibles al ambiente (desperdicios) y el último, II con las irreversibilidades del proceso. Cabe resaltar que la sumatoria de ellos corresponde a la unidad. De esto modo en el diagrama, tal como se ilustra en la figura 20, cada etapa del proceso es localizada con un vector definido por los tres indicadores, el cual se visualiza como un círculo de color y su ubicación con respecto de los vértices determina los puntos a mejorar del proceso.

De acuerdo con la Figura 20, la localización del vector para la primera separación indica que cerca del 56% de la exergía consumida ha sido aprovechada en la generación del producto mientras en la segunda separación alcanzó el 70% lo cual se observa en el gráfico por su proximidad al vértice IE. Sin embargo, en ambas separaciones, las condiciones de operación son muy cercanas a la del ambiente por tanto son localizadas muy distantes del vértice II. Lo que permite deducir que

las mejoras técnicas están direccionadas a la valorización de corrientes de desperdicio de cada unidad de operación.

Figura 20. Diagrama ternario exergetico del proceso obtención de aceite caso base



Adoptado de Aspen Plus v 10.4 y procesado por Matlab 9.1

Ahora bien, la extracción es la etapa con la eficiencia exergetica más baja del proceso debido a las irreversibilidades asociadas al consumo energético de la prensa. De otra parte, en la proximidad al vértice IW se evidencia que prevalece la valorización de las corrientes de desperdicio sobre las mejoras en las condiciones de operación de la extracción. Finalmente, la localización del indicador de eficiencia IE para la filtración, demuestra que la exergía consumida ha sido aprovechada al máximo, siendo la operación más eficiente del proceso.

4.1.2 *Análisis de Ciclo de Vida*

A continuación, se presentan los resultados del análisis ambiental los cuales corresponden a la segunda fase de la metodología descrita para el análisis exergoambiental del proceso de obtención de aceite.

Teniendo en cuenta el alcance del análisis del ciclo de vida, los procesos de cultivo, la producción (de aceite) y el envasado (de aceite) que integran la obtención de aceite Sacha inchi fueron definidos en el software Simapro 9.0. Los flujos de entrada y salida se establecieron para la producción de un 1 litro de aceite. La información utilizada para el presente trabajo de grado fue tomada *In situ* en los lugares en donde se lleva a cabo tanto el proceso de cultivo como el de extracción de aceite. La fase agrícola incluyó el uso 11 kg de fertilizantes orgánicos y la fase industrial el consumo de electricidad 4,70 kWh, tal como se presenta en la Tabla 15. Además, se identificó la generación de 5,34 kg de residuos caracterizados como biomasa (estrella, cáscara y torta), la cual podría ser aprovechada como materia prima en otros procesos industriales.

Para el envase se cuantificó un consumo de 0,20 kg de diesel para transporte y 0,12 kg asociado al cultivo, además del consumo de combustibles (diesel, gasolina) en maquinarias agrícolas. Adicionalmente, en la misma tabla se presenta el uso de 1,1 kg de botellas de vidrio color verde, correspondientes a 4 unidades para el envase de 1 litro de aceite.

Tabla 15. *Inventario para la producción de 1 litro de aceite de Sacha inchi caso base*

Entrada	Unidad	Cantidad			
		Cultivo	Producción	Envase	Total
(a)Maquinaria agrícola					

Entrada	Unidad	Cantidad		
		Cultivo Total	Producción	Envase
Diesel	kg	2,78E-2		2,78E-2
Gasolina	kg	5,41 E-2		5,41E-2
(b)Diesel Transporte	kg	0,12	0,20	0,32
(c)Fertilizantes				
Abono Fertisol	kg	1,14		1,14
Compostaje	kg	9,16		9,16
Microorganismos Eficientes				0,57
Melaza	kg	0,10		0,10
Suero	kg	0,10		0,10
Levadura	kg	3,13E-3		3,13E-3
Agua	L	2,08		2,08
(d)Semillas	kg	2,61E-3		2,61E-3
(e)Botella	kg		1,1	1,1
(f)Electricidad	kWh		4,70	4,70
(g)Residuos	kg		5,34	5,34

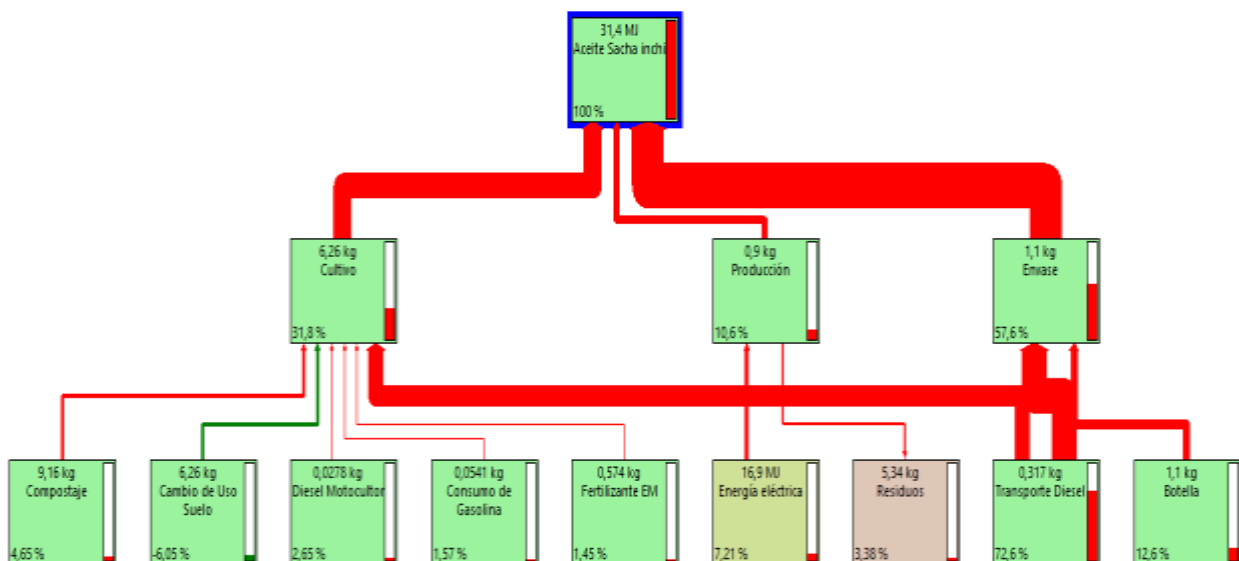
Es importante mencionar, que se utilizaron datos secundarios de la base Ecoinvent versión 2.2 relacionados con la producción de compost, la manufactura de las botellas y los residuos (analizados como sólidos provenientes de la agricultura con tratamiento). En lo que respecta al abono fertisol, se dispuso de la ficha técnica del producto (Fertisol S.A.S, 2020) y tomado de base de datos Ecoinvent 2.2

4.1.2.1 Evaluación e Interpretación ACV del proceso caso base. A continuación, se da a

conocer los resultados de las etapas analizadas mediante el software Simapro 9.0 utilizando el método *Impact 2002+*.

4.1.2.1.1 Diagrama de Árbol de Procesos del Caso Base. Se representa los resultados mediante el árbol de procesos con el fin de determinar las cargas e impactos ambientales, más relevantes en: cultivo, producción y envasado (de aceite) que integran la obtención de aceite de Sacha inchi tales como se ilustra en la Figura 21, para los cuales están definidos en términos de balances másicos, energéticos y las cargas ambientales correspondientes para cada uno de ellos en relación con la producción de 1 litro de aceite Sacha inchi.

Figura 21. Árbol de flujo del proceso de obtención de aceite Sacha inchi caso base

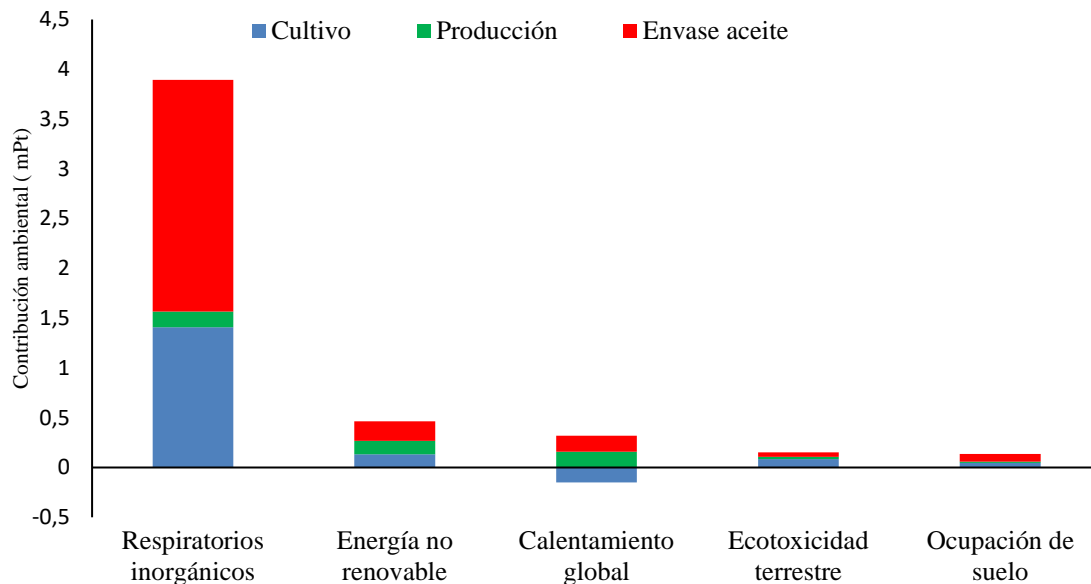


Adoptado del Software SimaPro v 9.0.

De la Figura 21 se puede evidenciar que el 57,6% del impacto por el *envase* se atribuye un 12,6% a la manufactura de la botella (equivalente al 21,9% del impacto total) y por transporte 45% (equivalente al 78,1%). La carga ambiental de 31,8% para el *cultivo*, se ve asociada principalmente en un 27,6% a transporte del fruto a la procesadora (73% del impacto total), seguido de 4,65% a la utilización de compostaje (contribución total de 12,3%) y del uso de diesel en el motocultor con un 2,65% (equivalente al 7 %) Sin embargo, en la etapa agrícola es posible identificar un flujo color verde, lo cual indica una contribución positiva al ambiente de 6,05%, relacionado con un mayor consumo de CO₂ de la atmósfera por cambio de suelo. La etapa *producción* tiene una significancia de 10.6%, la cual se asocia directamente con un 7,21% al consumo de energía eléctrica (68% del impacto total) y en un 3,38% a la generación de residuos provenientes de la fase industrial (equivalente al 32%).

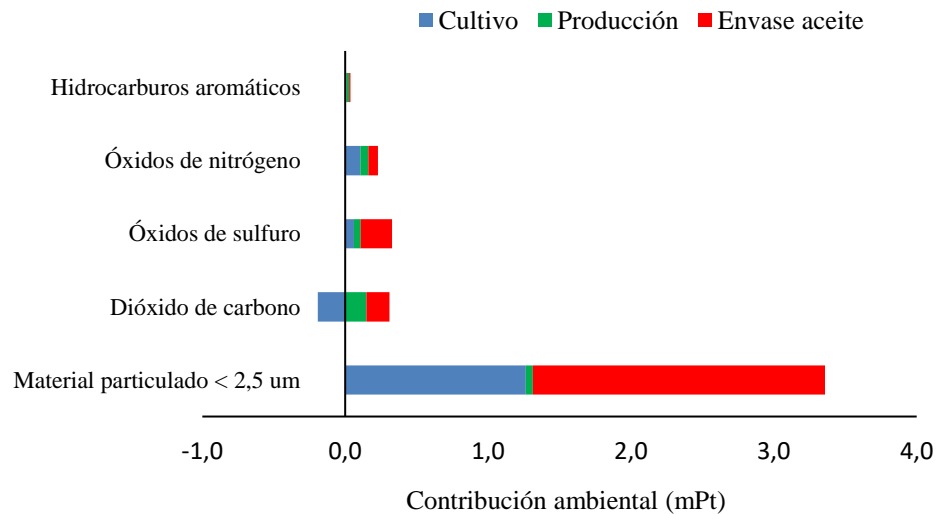
4.1.2.1.2 Puntuación Única de Impacto Ambiental para la Obtención de Aceite Caso Base.

Al realizar la normalización de los datos a la unidad de puntuación única (mPt), el simulador sólo activó 5 categorías de impacto que fueron significativas, las demás no fueron de exclusividad en carga ambiental. Por esto, la producción de aceite Sacha inchi, según la Figura 22, afecta las categorías de inorgánicos respiratorios con 3,89 mPt (81%), energía no renovable con 0,46 mPt (10%), calentamiento global con 0,16 mPt (3%), ecotoxicidad terrestre de 0,15 (3%) y ocupación del suelo con 0,13 mPt (3%).

Figura 22. Evaluación de puntuación única para categorías de impacto medio caso base

Adoptado del Software SimaPro v 9.0.

4.1.2.1.3 Caracterización de emisiones atmosféricas del proceso. Las emisiones atmosféricas generadas por la obtención de aceite Sacha inchi (Figura 23) se realizó mediante puntuación única(mPt), las cuales se ven reflejadas en el material particulado <2,5 um con una contribución de 82,51% (3,35 mPt), debido al uso de combustible diésel, el dióxido de carbono (CO₂) de 2,91% (0,12 mPt), los óxidos de sulfuro (SO_x) de 8,05% (0,33 mPt), los óxidos de nitroso(NO_x) de 5,63% (0,23 mPt) , debido a la combustión de los motores diésel y por último los hidrocarburos aromáticos de 0,89% (0,04 mPt).

Figura 23. Emisiones atmosféricas en el proceso de obtención de aceite caso base

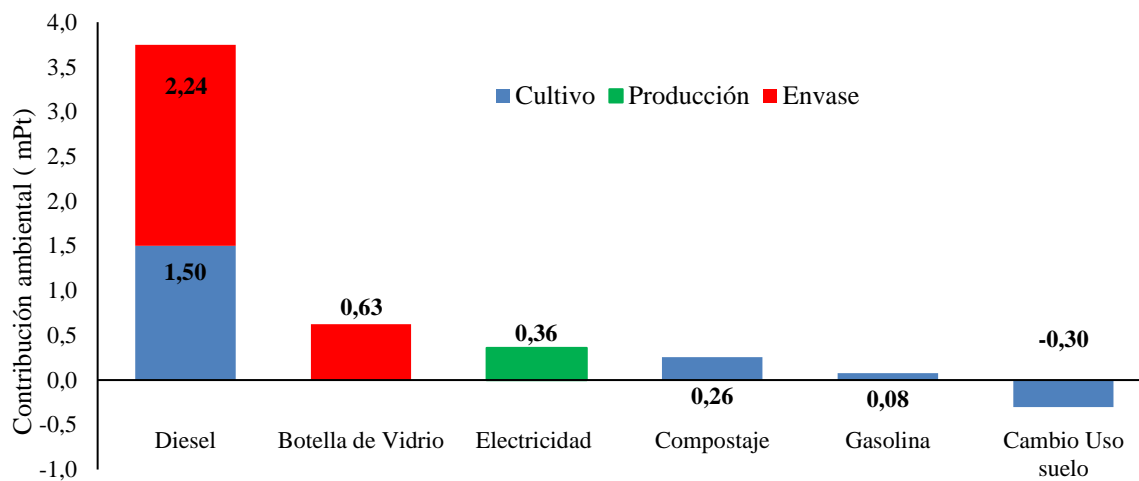
Adoptado de Simapro versión 9.0

4.1.2.1.4 Evaluación por Consumos de Recursos en la Obtención de Aceite Sacha Inchi.

La Figura 24, da a conocer, el aporte global por materias primas e insumos energéticos en la evaluación del proceso de obtención de aceite. Donde, el uso de combustible diesel tiene una puntuación única de 3,74 (78,64%), relacionada principalmente con la etapa envase y luego el cultivo; su contribución significativa es debido a la alta disponibilidad de este recurso que se requiere en los motores de combustión de los vehículos que transportan la botella desde la fábrica y el fruto del cultivo, hasta la planta procesadora. También, en menor significancia, el uso de diesel en el motocultor para la preparación del suelo, en la que la cantidad de terreno necesario por cada individuo de Sacha inchi es 1000 plantas por Ha. Seguidamente se encuentra en un porcentaje menor (13,12 %, 0,63 mPt) lo relacionado con la manufactura de la botella. Adicionalmente se refleja un aporte del 7,53% concerniente al consumo de electricidad establecido en el proceso de

transformación de fruto en aceite. Sin embargo, la actividad de cambio de uso del suelo tiene una influencia positiva del 6,32%, la cual compensa la carga ambiental del proceso.

Figura 24. Contribución ambiental global por materias primas e insumos energéticos en el proceso caso base



Adoptado de software Simapro 9.0

De manera semejante, los resultados del ACV, según la Figura 24, muestran que la producción de fruto Sacha inchi requerido para obtener 1L de aceite contribuye en un impacto ambiental de 1,54 mPt correspondiente a la etapa cultivo y los relacionados con el consumo de electricidad durante la transformación del fruto en aceite en 0,36 mPt. De lo anterior, se permite cuantificar los impactos ambientales en 1,90 mPt de los flujos de entrada del esquema de procesamiento considerado la fase industrial en la investigación.

Adicionalmente a lo anterior, los resultados obtenidos se compararon con un ACV realizado a un aceite de oliva con un alcance de la cuna a la puerta (Guarino et al., 2019, pp.402-406), evaluado

de acuerdo con el método ILCD Mid point2011 y el producto final similar en contenido de grasas insaturadas (70% - 80%). Encontrándose que, de manera similar al presente trabajo, la categoría de impacto inorgánicos representa entre el 80,6% de la carga ambiental del proceso, con mayor participación de la fase agrícola por el uso de fertilizantes. En la etapa de transformación, la producción de botellas es una de las fuentes más importantes de uso de energía en el ciclo de vida y de impacto ambiental (80-90%).

4.1.2.1.5 Estimación de la Huella de Carbono del Proceso. La huella de carbono es un indicador ambiental que refleja los gases emitidos por un individuo o empresa, ya que, mide la cantidad total del dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero asociados al proceso (Jolliet et al., 2016, p.54). La huella de carbono calculada en el software SimaPro 9.0, a 20 años (IPCC GWP 20a) fue de 4,28 kg de CO₂ equivalente. En otros estudios, se informó la cantidad de 3,09 kg de CO₂ equivalente para el proceso de obtención de aceite de canola (Khanali et al., 2018, p.730).

4.1.3 Evaluación Exergoambiental del Proceso Caso Base

Una vez se realizó el análisis exergético y ambiental, de forma individual fue necesario estimar las variables exergoambientales con el propósito de evaluar el rendimiento ambiental del proceso. Con la finalidad de conocer los impactos relacionados con las corrientes de procesos intermedios de la transformación en aceite, se formuló el balance de impactos ambientales a nivel de etapas, en la cual se estableció que los impactos ambientales asociados con las corrientes de exergía que

entran a la etapa tienen que salir de la etapa con sus flujos de salida tal como se presentó en la Tabla 7.

Además, involucró la formulación de las ecuaciones auxiliares F a nivel de etapa en la solución del sistema de ecuaciones lineales propuestos. De este modo, la consideración de las interconexiones entre las etapas del sistema permitió conocer el flujo de impactos ambientales de las corrientes intermedias y de salida del sistema.

En la Tabla 16 se da conocer los flujos de impactos ambientales \dot{B}_j de las corrientes de entrada y salida de cada etapa del esquema de obtención de aceite caso base, así mismo los impactos ambientales específicos b_j de cada corriente, los cuales se determinaron para estimar las variables contempladas en la evaluación exergoambiental.

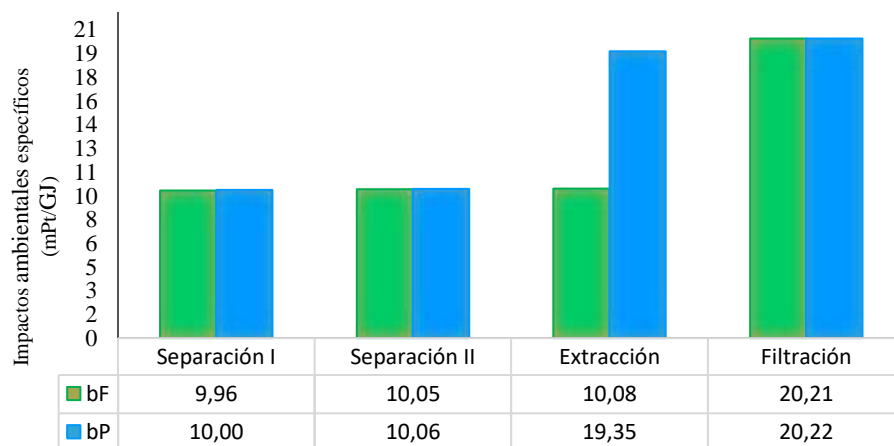
Tabla 16. Flujo de impactos ambientales e impactos ambientales específicos del esquema base

Corriente entrada	b_j (mPt/GJ)	\dot{B}_j (mPt/h)	Corriente salida	b_j (mPt/GJ)	\dot{B}_j (mPt/h)
C1	9,96	24,53	C3	9,96	10,67
C2	21,14	10,66	C4	10,05	13,99
C5	21,14	0,04	C6	10,05	4,16
C8	21,14	5,54	C7	10,08	9,86
C11	21,14	0,01	C9	10,08	4,34
			C10	20,21	11,06
			C12	20,21	0,11
			C13	20,22	10,96

La primera variable exergoambiental definida en la ecuación $\dot{B}_j = b_j \dot{E}_j$ (12) como tasa de impactos ambientales de las corrientes del proceso \dot{B}_j , calculada a nivel global, muestra que la producción del fruto proveniente del cultivo representó una tasa de impactos ambientales de 24,53 mPt/h y que a medida que se transformó en aceite, incrementó un 23,27% de carga ambiental por cada hora de funcionamiento del proceso de obtención de aceite, debido al consumo de electricidad por los cuatro equipos considerados en la fase industrial.

En cuanto a los resultados obtenidos para las variables exergoambientales definidas en las ecuaciones $b_{F,k} = \frac{\dot{B}_{F,k}}{\dot{E}_{F,k}}$ (13) $b_{P,k} = \frac{\dot{B}_{P,k}}{\dot{E}_{P,k}}$ (14) para cada etapa del proceso caso base, se muestran en la Figura 25. El impacto ambiental específico de combustible ($b_{f,n}$) y producto ($b_{p,n}$) se obtuvieron de la relación entre los valores de las tasas de impactos ambientales en mPt/h como se presentan en la Tabla 16 y los flujos exergéticos en GJ/h correspondientes por etapa tal como se definieron en la Tabla 5.

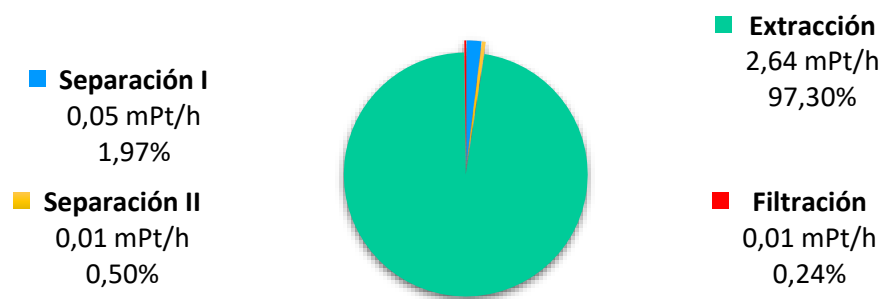
Figura 25. Impacto ambiental específico de combustible y producto del proceso caso base



En la Figura 25 se observa que los valores obtenidos del impacto ambiental específico del combustible y del producto para cada etapa, están de acuerdo con lo propuesto por Meyer et al., (2009), con una relación entre la influencia de la posición relativa de la etapa dentro del sistema y su interconexión con otras, por tanto, las que están próximas a la fuente exergética, que, en este caso, está relacionado con la primera separación, presentó valores bajos $b_{f,n}$ y $b_{p,n}$ (9,96 mPt/GJ y 10,00 mPt/GJ) y las distantes de la fuente, como lo es la filtración, presentaron valores más altos (20,21 mPt/GJ y 20,22 mPt/GJ). Lo que evidencia el aumento de los impactos ambientales de dentro del proceso para alcanzar el producto final. Cabe señalar que $b_{p,n}$ aumentó considerablemente 9,35 mPt/GJ entre la segunda y tercera etapa a diferencia de $b_{f,n}$ en 0,03 mPt/GJ, esto debido a los impactos ambientales asociados con el alto consumo energético en la extracción del aceite.

En relación con la definición de variable \dot{B}_D en la ecuación $\dot{B}_D, k = b_{F,k} * \dot{E}_{D,k}$ (15), se identifican los impactos ambientales asociados con la destrucción de exergía por cada etapa del proceso y se muestran en la Figura 26.

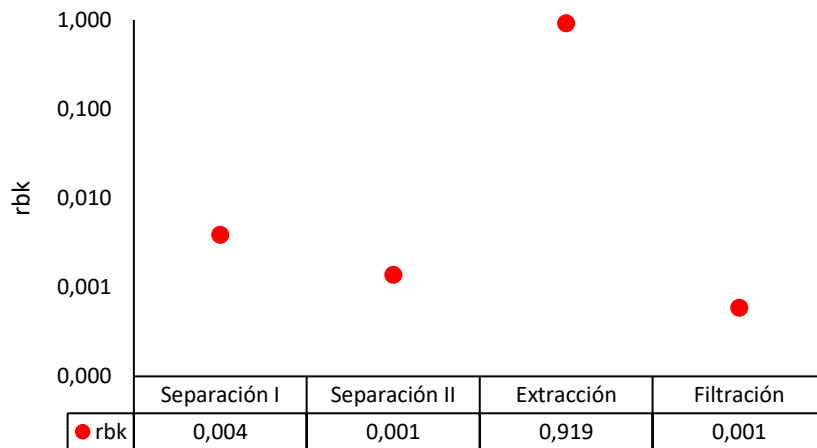
Figura 26. Tasa de impactos ambientales por destrucción de exergía por etapas en la obtención de aceite caso base



Los valores de la variable \dot{B}_D (Figura 26) muestran que la extracción resultó ser la etapa que generó la mayoría de los impactos ambientales por irreversibilidades dado su alto requerimiento energético, representando cerca del 97,30% de 2,71 mPt/h estimados en todo el proceso. Mientras las demás etapas del proceso, en menor significancia, contribuyen en un 3% a la carga ambiental estimada por destrucción de exergía.

Ahora bien, la última variable; diferencia relativa de los impactos ambientales específicos ($r_{b,k}$) definida como la relación entre la diferencia de los impactos ambientales específicos de producto-combustible y el de combustible y descrita en la ecuación $r_{b,k} = \frac{b_{P,k} - b_{F,k}}{b_{F,k}}$ (16, se utilizó para identificar el potencial de mejora de cada una de las etapas del proceso con respecto a su desempeño ambiental. Los valores de la variable se presentan en la Figura 27 a escala logarítmica, en vista de que permite una mayor visualización de la posición de las etapas frente las otras involucradas en el análisis.

Figura 27. Diferencia relativa del impacto ambiental específico de las etapas del proceso caso base



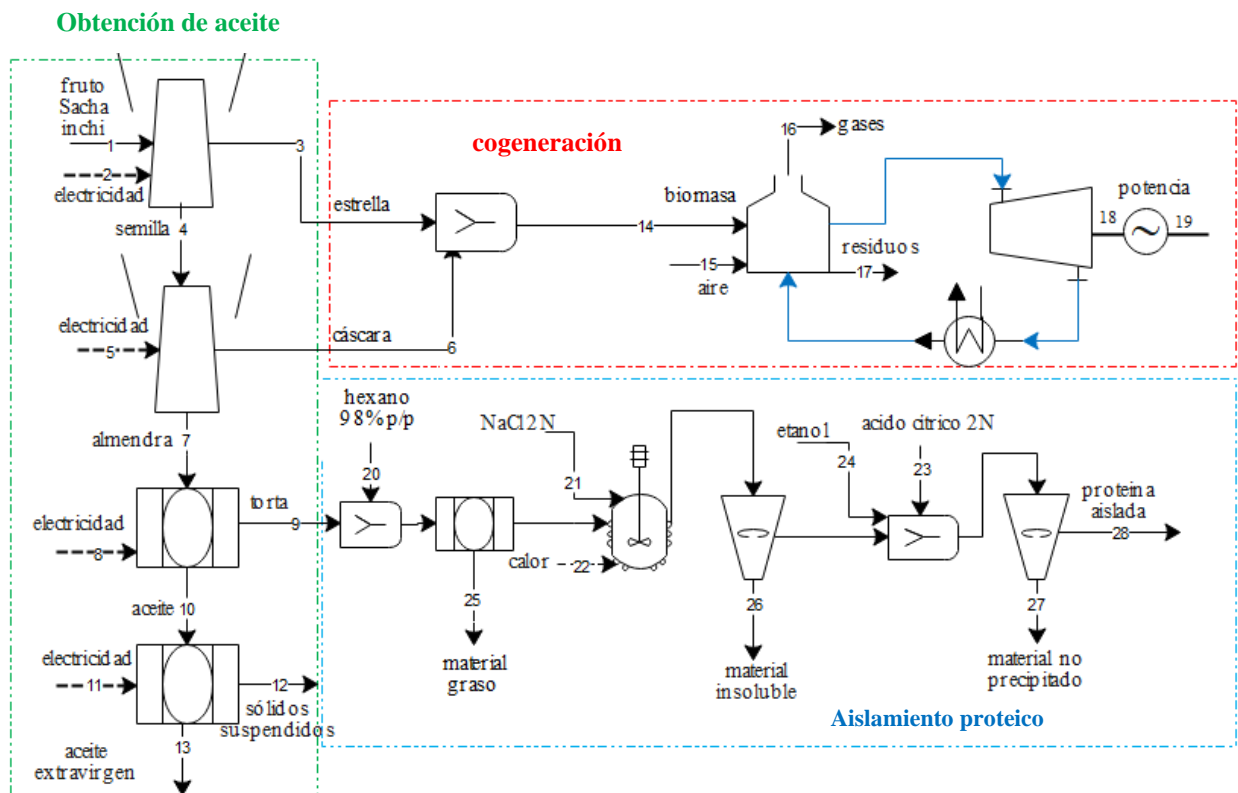
Con base en Figura 27, se evidenció la extracción como la etapa que ofrece el potencial de mejora más alto al obtener un valor mayor con respecto a las demás etapas, con un diferencial porcentual de 99,58%, lo que quiere decir, que en esta unidad de proceso es posible reducir los impactos ambientales con un esfuerzo relativamente bajo, mientras para las etapas separación I, separación II y filtración se requieren esfuerzos mayores para lograr un mejor desempeño ambiental.

4.2 Diseño de Estrategias de Valorización de Corrientes del Proceso de Obtención de Aceite

En el proceso productivo del estudio de caso, los resultados de la simulación en Aspen Plus contabilizan cerca de 6 t mensualmente, correspondiendo en un 53% estrella, 24 % cáscara y 23% torta, las cuales son considerados como residuos y podrían ascender al incrementar la demanda del aceite Sacha inchi como se espera en los próximos años. Adicionalmente el análisis de ciclo de vida evidencia que la acumulación de dichos residuos influye en la carga ambiental del proceso global cerca del 8%. Por otro lado, según los resultados del diagrama exergético ternario en el análisis exergético, recomienda la valorización de estas corrientes intermedias. De la misma manera, en la evaluación exergoambiental se identifica las etapas; separación I, separación II y la extracción como componentes de mayor impacto ambiental. Por tanto, se propone soluciones ingenieriles para su aprovechamiento reconociéndolos como un material con potencialidades nutricionales de fibra y proteína con fines energéticos y alimenticios respectivamente.

Con el objetivo de valorizar las corrientes intermedias del esquema de biorrefinería, se propone aprovechar la corriente estrella (#3) y la cáscara (#6) (proveniente de las unidades de separación) en un sistema de cogeneración, debido a su alto contenido exergético y la corriente torta (#9) residual de la etapa extracción en el proceso de aislamiento proteico. En la Figura 28, se observa las corrientes de entrada, intermedias y de salida del proceso.

Figura 28. Esquema general de la biorrefinería de obtención aceite Sacha inchi



De acuerdo con la Figura 28, el proceso bajo concepto de biorrefinería presenta el aceite (#13) y el concentrado proteico (#28) como productos. Además, la electricidad como energía de salida

de la etapa de cogeneración (#19); con aprovechamiento energético en la obtención del aceite, correspondiente a los flujos de # 2, #5, #11 y #8 (47% de requerimiento de la prensa). Cabe mencionar que para la corriente #16, no se incluye el tratamiento de gases de combustión generados.

4.3 Análisis Exergoambiental de Las Estrategias de Valorización del Proceso de Obtención de Aceite Sacha Inchi

Los resultados que se muestran a continuación siguen la metodología descrita en el caso base. En primer lugar con el análisis exergético, de acuerdo con lo propuesto por (Dincer & Ronsen,2013, pp.21-30), en donde se establecen tres etapas que se describen a continuación.

4.3.1 Análisis Exergético Del Esquema Biorrefinería De Obtención De Aceite

El análisis exergético tal como se describió en la sección 3.3 de la metodología, implicó inicialmente la definición de las etapas del esquema biorrefinería como un volumen de control (Figura 28). Seguidamente la simulación de las etapas de valorización en estado estable, la cual permitió calcular los balances de masa, energía y propiedades termodinámicas como entropía y entalpia de las corrientes del proceso.

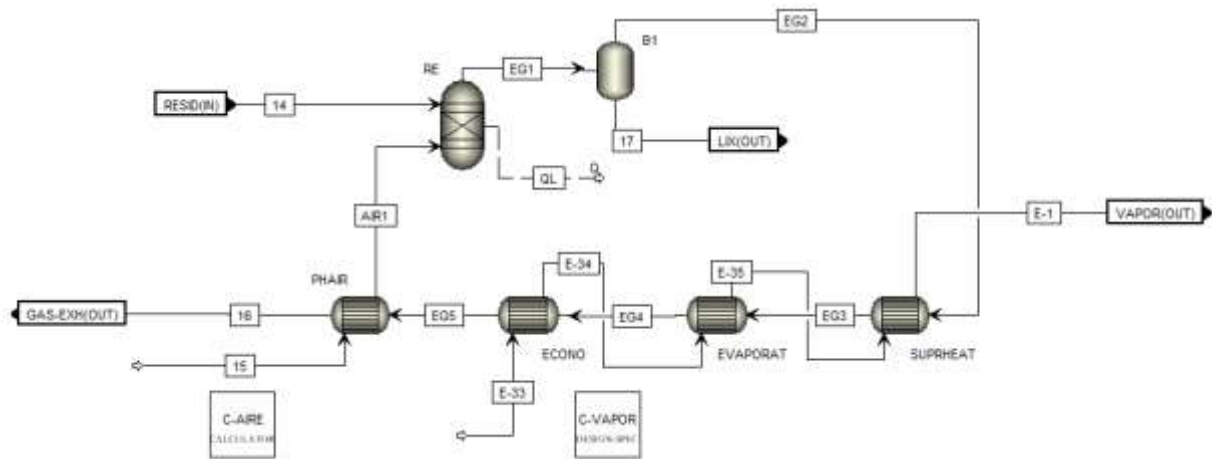
4.3.1.1 Simulación de las Estrategias de Valorización del Esquema Biorrefinería. Las etapas de valorización de corrientes intermedias del proceso de obtención de aceite descritas en la Figura 28, fueron simuladas en el software Aspen Plus v10.4 teniendo en cuenta la metodología

establecida en el caso base. A continuación, se describe las etapas cogeneración y aislamiento proteico que hacen parte del esquema de biorrefinería propuesto.

En la configuración del sistema para la cogeneración, se utilizó la biomasa disponible (66 kg/h) como combustible y se consideró dos bloques de jerarquía: uno para la caldera y otro para la turbina. En seguida se presentan las consideraciones, así mismo los flujos de entrada y salida de los dos bloques:

1. **Caldera:** Se usó un reactor estequiométrico (RE) y un arreglo de cuatro intercambiadores de calor como se muestra en la Figura 29.

Figura 29. Esquema de la caldera en Aspen Plus



Adoptado del Software Aspen Plus v.10.4

Las reacciones químicas consideradas en la combustión de los componentes de la biomasa (#14) relacionados con los triglicéridos y la fibra (lignina, celulosa y hemicelulosa) que tuvieron lugar en el equipo (RE) se simularon con un 98 % de eficiencia y se presentan en la Tabla 17. Además

del flujo de aire (#15) que ingresa con una composición 23 % O₂ y 77 % de N₂ se estimó con la herramienta Fortran del software *Aspen Plus*, teniendo en cuenta un exceso del 10%.

Tabla 17. Reacciones químicas del proceso de combustión de la biomasa

Compuesto	Estequiometría
Celulosa	$C_6H_{10}O_5 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 5H_2O$
Hemicelulosa	$C_5H_8O_4 + 5O_2 \rightarrow 5CO_2 + 4H_2O$
Lignina	$C_{7,3}H_{13,9}O_{1,3} + 10,125 O_2 \rightarrow 7,3CO_2 + 6,95 H_2O$
Trilinoléico	$C_{57}H_{92}O_6 + 77 O_2 \rightarrow 57CO_2 + 46 H_2O$
Trilinoleico	$C_{57}H_{98}O_6 + 77 O_2 \rightarrow 57CO_2 + 49 H_2O$
Trioleico	$C_{57}H_{104}O_6 + 80 O_2 \rightarrow 57CO_2 + 52 H_2O$
Tripalmítico	$C_{51}H_{98}O_6 + 72,5 O_2 \rightarrow 51CO_2 + 49 H_2O$
Triesteárico	$C_{57}H_{110}O_6 + 81,5 O_2 \rightarrow 57CO_2 + 55 H_2O$

Los flujos de las principales corrientes presentadas en la Figura 29, además de las propiedades termodinámicas se pueden observar en la Tabla 18. Los resultados muestran que la caldera alcanza una razón de producción de 2.7 de kg vapor/ kg de biomasa consumida, a 66 atm, 510°C con una eficiencia energética de 43%, la cual fue determinada por la relación entre la energía térmica de vapor producido y el flujo de energía disponible de la biomasa teniendo en cuenta el PCI de 18,75

MJ/kg. En el Apéndice E se presentan las composiciones de las corrientes principales de este bloque.

Tabla 18. *Propiedades energéticas de las principales corrientes de la caldera*

Corriente	Naturaleza	T (°C)	P (atm)	\dot{m} (kg/h)	h (kJ/h)	s (kJ/kg-K)
14	Biomasa*	25	1	65,89	-476536,09	-20,99
15	aire	25	1	388,67	-1,05E-11	0,14
16	Gases combustión	104	1	439,65	-1299652,45	0,32
17	Residuos	1249	1	14,91	-35610,50	-1,06
E-1	Agua**	510	66	175,10	-2181670,85	-2,50
E-33	Agua***	102	71	175,10	-2719447,32	-8,07

Nota: * PCI (18,75 MJ/kg) ** Vapor sobrecalentado *** Liquido comprimido

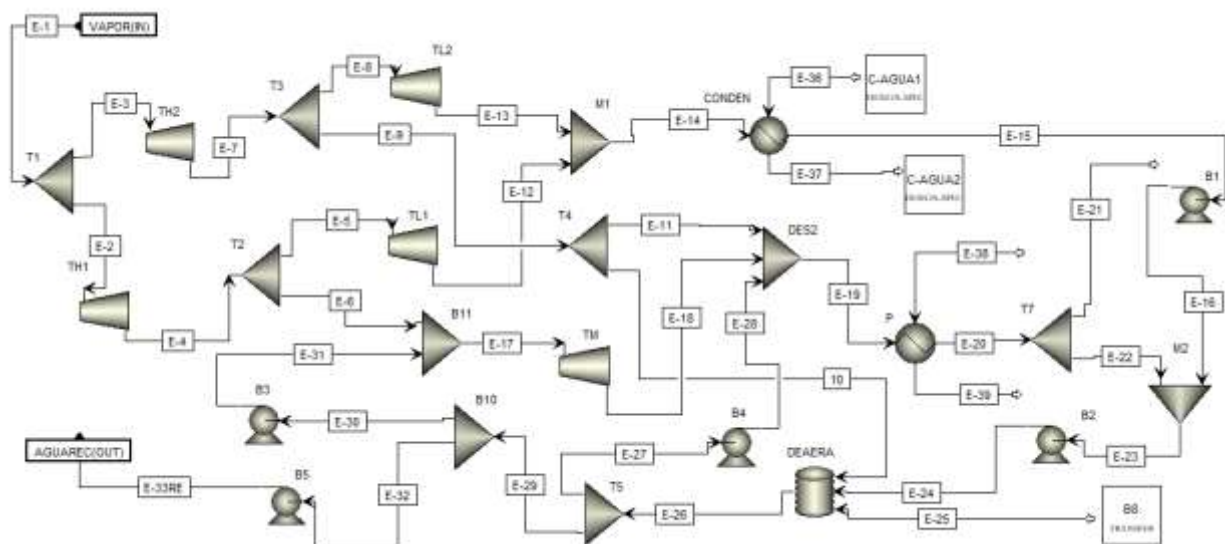
Específicamente hablando del contenido energético de la biomasa de las capas externas de la almendra Sacha inchi que corresponden a la estrella y cáscara, se encontró un valor de PCI de 18,75 MJ/kg, muy similar al PCI 18,55 MJ/kg reportado por (Lakkhana et al., 2017, pp.871).

2. **Turbina.** En la Figura 30 se visualiza la configuración que fue simulada para este bloque.

La corriente de vapor (E-1) proveniente de la caldera, se divide en dos flujos iguales que ingresan a dos turbinas de alta presión TH₁, TH₂ estas a su vez en TL1 y TL2 de baja presión y parte del vapor generado en el ciclo termodinámico se direcciona con una turbina de accionamiento directo TM.

El vapor agotado después de pasar por las turbinas continúa hasta el CONDEN donde se enfría y el agua líquida condensada se circula en el proceso. Esta última, junto con todos los efluentes del proceso se envía a un desaierador que funciona con vapor a 2,5 atm con la finalidad de eliminar los gases disueltos. Adicionalmente, se ingresa una corriente de reposición de agua al efluente del desaierador, para luego transportar el flujo resultante(33RE) a la caldera y dar nuevamente inicio al ciclo. Los datos termodinámicos, así como los flujos de entrada y salida de cada equipo son presentados en el Apéndice E.

Figura 30. Esquema de la turbina en Aspen Plus



Adoptado del Software Aspen Plus v 10.4

Para simular TH₁, TH₂, TL₁, TL₂ y TM se usó el modelo turbina isentrópica, donde los cálculos se llevaron a cabo teniendo en cuenta la eficiencia isentrópica (η_T) de cada etapa proporcionada

por el fabricante, la cual se presentan en la Tabla 18. Adicionalmente se ingresó la presión de descarga y la eficiencia mecánica al simulador, con base en lo publicado por (Palacios-Bereche & Nebra ,2009, p.4).

En la Tabla 19 se muestra los resultados de la simulación de las turbinas de vapor, donde se presenta el flujo de masa de vapor, así como las condiciones de entrada y salida de temperatura y presión en cada turbina. Así mismo, la potencia neta (W_{neta}) producida en cada una de ellas. En donde el sistema alcanzó 37.28KW de potencia neta resultante de las cinco turbinas.

Tabla 19. *Condiciones de operación y potencia producida en las turbinas*

		TH₁	TL₁	TH₂	TL₂	TM
m_{vapor}	(kg/h)	87,55	26,26	87,55	26,26	63,11
T_{in}	(°C)	510	344,47	510	146,87	305,03
P_{in}	(atm)	66,12	16,77	66,12	2,46	16,77
T_{out}	(°C)	344,46	45,80	146,78	45,80	189,17
P_{out}	(atm)	16,77	0,09	2,46	0,09	2,46
X_{out}		-	0,89	-	0,93	-
η_T	(%)	80,6	86,2	87,2	79,20	55,55
W_{indi}	(kW)	8,38	5,84	17,83	2,88	3,99
W_p	(kW)	0,35	0,25	0,76	0,12	0,17
W_{neta}	(kW)	8,02	5,59	17,07	2,76	3,82

Nota: resultados de la simulación en Aspen Plus

Para la remoción de los triglicéridos de la biomasa por extracción con solventes, se utilizó un separador genérico (B12) especificando la relación de reparto de los componentes hacia las corrientes de salida. La extracción salina involucró equipos de mezclado(B14) y suministro de calor (B15) para solubilizar la proteína que luego fue apartada del resto de los compuestos no solubles mediante un separador genérico(B16). Finalmente, la precipitación isoelectrica en solución ácida consideró una unidad de mezclado(B17) por la adición de un agente precipitante y un separador genérico(B18) teniendo en cuenta la fracción de fase sólida de salida de la proteína.

Los datos termodinámicos obtenidos de la simulación del aislamiento proteico se presentan la Tabla 20 y las composiciones de las corrientes en el Apéndice E. Se debe agregar que la presión fue de 1 atm (condición estándar) para todas las operaciones que comprenden esta etapa.

Tabla 20. *Propiedades fisicoquímicas de las corrientes principales del aislamiento proteico*

Corriente	\dot{m} (kg/h)	x_i proteína	T (°C)	h (kJ/h)	s (kJ/kg-K)
9	19,44	0,47	25	-120674,08	-7,68
20	117	-	25	-269482,72	-7,56
21	395,60	-	25	-5820972,47	-7,86
23	0,10	-	25	-803,08	-5,56
24	144,15	-	25	-2173202,36	-8,90
25	122,85	-	24	-280977,42	-7,49
26	401,43	-	50	-5816681,64	-7,59
27	150,58	0,02	26	-2242033,80	-8,84
28	1,04	0,92	26	-7301,06	-6,84

Evaluando el rendimiento del aislamiento proteico, el resultado muestra que tan solo en un 11% se aisló el contenido proteico de la torta (#9) y con ello una baja producción de concentrado proteico (#28) siendo un producto de valor agregado resultante de la biorrefinería. Sin embargo, la concentración de la proteína aislada fue del 92% tal como se presenta en Tabla 20. Su bajo rendimiento se relacionó posiblemente con el uso de solventes verdes como cloruro de sodio (#21) y ácido acético (#23) para la solubilización y precipitación respectivamente. Según los hallazgos que encontró Rodríguez (2020), con otros procesos que involucró sustancias peligrosas hidróxido de sodio y ácido clorhídrico como solventes, se alcanzaron rendimientos superiores hasta del 88%.

Es importante señalar en esta estrategia de valorización, que para el mejoramiento de la solubilidad de la proteína, en una primera fase del aislamiento como se ilustra en la Figura 31, el proceso incluyó el consumo de hexano(#20) de 6 kg/ kg de biomasa, considerándose este solvente como tóxico e inflamable, pero determinante en la remoción cerca del 33% de triglicéridos presente en la torta generada en la prensa proveniente de la empresa estudio y caracterizada por Rodríguez, (2020) .

4.3.1.2 Evaluación Exergética de las Estrategias de Valorización de las Corrientes Intermedias del Proceso de Obtención de Aceite Sacha Inchi. Partiendo de los resultados de la simulación de las etapas cogeneración y aislamiento proteico, se calcularon las exergías de corriente, trabajo y calor en cada estrategia de valorización. Seguidamente se caracterización en exergía de combustible y producto, de acuerdo con la definición y su función dentro de la etapa,

tal como se describió en la Tabla 8. Por último, se llevó a cabo la estimación de la destrucción de exergía según la Ecuación 6 y la eficiencia exergética conducida a nivel etapa tal como se describió en la metodología.

De acuerdo con ello, en la Tabla 21 se muestran los resultados para la cogeneración, en donde la electricidad generada (#19) corresponde a la exergía de producto en la etapa, cuantificada cerca de 131 MJ/h. Además de las exergías de corriente de entrada de la biomasa (#14) y aire (#15), sin componentes físicos, debido a que su condición de temperatura y presión está al ambiente de referencia. Y también las exergías de corriente de salida relacionadas con los gases de combustión (#16) y los residuos de la caldera (#17).

Tabla 21. Evaluación exergética de la etapa cogeneración del esquema biorrefinería

Corriente	Exergía de corriente (MJ/h)		Exergía de trabajo (MJ/h)	
	Ex_f	Ex_q	Ex_w	
14	0	1484,93	19	131,19
15	0	1,73		
16	4,23	16,71		
17	23,18	331,71		
Exergía de combustible (MJ/h)		1138,23		
Exergía de producto (MJ/h)		131,19		
Variables exergéticas				
E_D (MJ/h)		1007,04		
ϵ_k (%)		42%		

Nota: E_D destrucción de exergía ϵ_k eficiencia exergética

En la Tabla 21 se evidencia la magnitud de las irreversibilidades en 1007,04 MJ/h, las cuales representaron el 68% de la exergía de la biomasa (#14). Lo que sustentó el valor bajo de eficiencia exergética del 42% en la etapa cogeneración. La destrucción de exergía está asociada principalmente con la combustión en la caldera, dada la interacción de sustancias de naturalezas diferentes y con desiguales concentraciones y temperaturas. Además, en menor significancia, con los procesos de transferencia de calor que se produce en la caldera bajo una acentuada diferencia de temperatura entre los gases y la sustancia de trabajo, el agua.

En trabajos publicados de sistemas de cogeneración empleando biomasa lignocelulósica como combustible, se estimaron eficiencias exergéticas muy cercanas o incluso menores a la del estudio siguiendo la metodología descrita en esta investigación (Cavalcanti et al., 2020, p.7) que utilizaron bagazo de caña de azúcar, obtuvieron eficiencias exergéticas de 18,73%, debido al alto contenido de humedad del combustible (se consume calor para evaporar esta humedad). (Cavalcanti et al., 2019, p.8) también obtuvo un resultado similar, con una eficiencia exergética del 16,89%, para una planta de cogeneración utilizando biomasa de eucalipto. En ambos sistemas, la caldera fue la responsable de la mayoría de las irreversibilidades en un 61,57% y 83,28 % respectivamente.

En lo concerniente al aislamiento proteico, en la Tabla 22 se da a conocer las exergías de corriente de entrada y salida de la etapa, como se denotaron en la Figura 28 del esquema biorrefinería, además la exergía de calor suministrada al proceso (#22). De acuerdo con las definiciones de cada una de ellas y su función dentro de la etapa, se caracterizó en exergías de combustible y producto tal como se describió en la Tabla 8.

Tabla 22. Evaluación exergética del aislamiento proteico del esquema biorrefinería

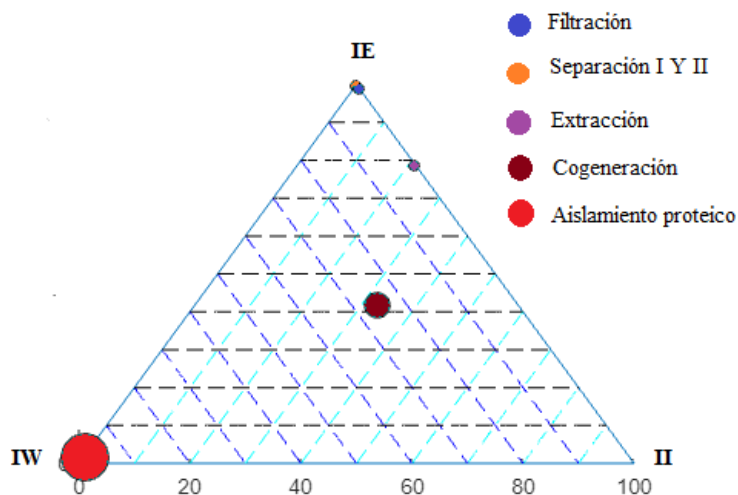
Exergía de corriente (MJ/h)					
Corriente de entrada	Ex _f	Ex _q	Corriente de salida	Ex _f	Ex _q
9	0	977,88	25	5,13E-3	5842,95
20	0	5598,11	26	0	135,44
21	0	20,48	27	0	403,58
23	0	1,32	28	0	15,89
24	0	346,09			
Exergía de calor, #22 (MJ/h)			2,92		
Exergía de combustible		(MJ/h)	12,97		
Exergía de producto		(MJ/h)	14,79		
Variables exergéticas					
E_D		(MJ/h)	1,82		
ε_k		(%)	87,7		

Nota: **E_D** destrucción de exergía **ε_k** eficiencia exergética

Como se puede observar en la Tabla 22, en el aislamiento proteico se presentan irreversibilidades cuantificadas en 1,82 MJ/h, de menor magnitud al de cogeneración y por consiguiente la eficiencia exergética en un 88%. El valor de la destrucción de exergía se sustenta en las reacciones químicas que tienen lugar en los diferentes procesos que implica aislar la proteína y lo relacionado con el consumo de calor en el proceso. Por otra parte, se evidencia el bajo contenido exergético de la proteína aislada (#28) cerca de 16 MJ/h, correspondiendo al 4% de la biomasa que ingresa a la etapa aislamiento, lo cual indica su aprovechamiento con fines alimenticios.

4.3.1.3 Diagrama Exergético Ternario del Esquema Biorrefinería. Con la finalidad de evaluar las cuatro etapas del proceso de obtención de aceite, en donde las corrientes anteriormente caracterizadas como desperdicios ahora son valorizadas; la Figura 32, da a conocer, la nueva ubicación del vector (II, IE, IW) para cada una de ellas. Así mismo, en dicho diagrama exergético se presenta el vector para las estrategias de valorización con el propósito de identificar posibles mejoras técnicas de los procesos involucrados a partir de la estimación de los indicadores exergéticos según lo indica las Ecuación 8 Ecuación 10.

Figura 32. Diagrama ternario exergético del esquema biorrefinería



Adoptado del *Aspen Plus* v 10.4 y procesado por *Matlab* 9.1

Como se observa en la Figura 32, en las separaciones I y II (indicador naranja) se alcanzan eficiencias cerca del 100% cuando se valorizaron las corrientes de residuos en sistemas de cogeneración. De manera semejante, la extracción es más eficiente cuando se hace

aprovechamiento del residuo generado en esta etapa. Sin embargo, se expone la consideración de mejoras en las condiciones de la unidad de extracción para lograr aún eficiencias más altas. En lo que respecta a las estrategias de valorización, la cogeneración presenta irreversibilidades debido a los procesos de combustión en las caldera y corrientes de salida a temperatura muy altas con referencia al del entorno, lo que refleja eficiencia en un 42%. Mientras en el aislamiento, el bajo contenido exergético cuantificado en 15,89 MJ/h para la proteína concentrada (#28) tal como se registra en la Tabla 22, siendo este el producto de la etapa; sustenta el valor cerca del 0% en cuanto a eficiencia exergética, además su proximidad a la extremo IW corrobora el desaprovechamiento exergético en las corrientes de salida del proceso.

4.3.2 Análisis Ambiental del Esquema Biorrefinería del aceite Sacha Inchi

El análisis ambiental del esquema biorrefinería de obtención de aceite se realizó de acuerdo con el método de análisis del ciclo de vida, que se muestra a continuación:

4.3.2.1 Definición del Objetivo y Alcance. Para realizar el ACV, como objetivo se planteó la identificación, evaluación y análisis de los potenciales impactos ambientales del esquema biorrefinería de obtención de aceite de la “cuna a la puerta”, siendo este el alcance también definido en el caso base.

En las etapas incluidas de estrategias de valorización cogeneración y aislamiento proteico, no fueron considerados los impactos ambientales relacionados al uso de los equipos y el transporte de los insumos requeridos en el caso del aislamiento de la proteína. Por otra parte, el esquema biorrefinería presenta el aceite como producto principal y el concentrado proteico como

coproducto, por lo tanto, la distribución de la carga ambiental se hizo entre ellos, teniendo en cuenta el contenido energético asociado a cada uno. La cual representó el 98% y 2% de asignación de impactos ambientales respectivamente, tal como se presenta en la Tabla 23, además de la producción de 0,0065 kg de concentrado proteico por litro de aceite Sacha inchi y el poder calorífico inferior obtenidos a partir de la simulación en Aspen Plus.

Tabla 23 . Factores de asignación de la producción de aceite Sacha inchi esquema biorrefinería

Producto	Flujo másico (kg/h)	PCI(MJ/kg)	% Asignación
Aceite Sacha inchi	0,9	34,89	98%
Concentrado proteico	6,51E-2	11,35	2%

4.3.2.2 Análisis del Inventario. Para el inventario del análisis de ciclo de vida se dispuso de la información del esquema base y adicionalmente se incluyó los datos de flujos de materia y energía de entrada y salida de las etapas cogeneración y aislamiento simuladas en Aspen Plus. En la Tabla 24 se presenta el inventario para la primera estrategia de valorización cogeneración con base en la unidad funcional (UF), la cual viene siendo la producción de 1 litro de aceite Sacha inchi. Es importante mencionar que la disponibilidad del agua en el ciclo termodinámico representó el requerimiento de agua por los dos condensadores para el cambio de fase del vapor agotado de salida de las turbinas, como se puede observar en el diagrama de flujo en Aspen Plus en la Figura 30.

Tabla 24. *Inventario para la etapa cogeneración en el esquema biorrefinería*

Parámetro Planta	Valor	Unidades
Biomasa entrada caldera	4,12	kg/UF
PCS ^(a) biomasa	20871,50	kJ/kg
Producción de cenizas	0,93	kg / UF
Producción por hora de energía eléctrica	2,35	kWh
Potencia del sistema de generación eléctrica	2,35	kW

Nota: ^(a) Estimado a partir de la correlación entre la exergía de flujo química Ex_{ch} y el poder calorífico, citada por Pantoja Guerrero (2018).

Ahora bien, los impactos ambientales debido al consumo de electricidad de la red (mix energético) correspondientes a productos evitados y lo relacionado con las cenizas generadas sin tratamiento como resultado de la combustión, se tomaron de los procesos registrados en la base de datos *Ecoinvent*. En lo referente con las emisiones a la atmósfera por combustión de la biomasa en la caldera, se obtuvieron de la simulación en Aspen Plus y se indican en la Tabla 25.

Tabla 25. *Emisiones atmosféricas por combustión en la etapa cogeneración*

Sustancia	Valor	Unidad
Dióxido de carbono Biogénico	6,02	kg/UF
O ₂	0,62	kg/UF
N ₂	18,71	kg/UF

Sustancia	Valor	Unidad
H ₂ O	2,17	kg/UF
Ceniza (Silica)	6,61E-2	kg/UF

Nota: UF: Unidad Funcional.

Con respecto a la segunda estrategia de valorización, la Tabla 26, da a conocer el inventario de la etapa aislamiento proteico. La cual involucró el uso de sustancias químicas para llevar a cabo la extracción salina y la precipitación isoeléctrica, además el requerimiento de calor para alcanzar la solubilidad de la proteína a una temperatura de 50°C. Así mismo, implicó flujos de salida de reactivos y componentes restantes de la torta residual cuantificados en 3,30E-2 m³, las cuales se asumieron residuos dentro de la base de datos *Ecoinvent* del simulador *Simapro*.

Tabla 26. *Inventario para la etapa aislamiento en el esquema de biorrefinería*

Parámetro Planta	Valor	Unidades
Torta	1,22	kg/UF
PCS* torta	20485,16	kJ/kg
Consumo de hexano	7,34	kg/UF
Consumo de Cloruro de sodio	2,90	kg/UF
Consumo de ácido cítrico	6,35E-3	kg/UF
Consumo etanol	0,73	kg/UF
Consumo agua	30,25	m ³ /UF

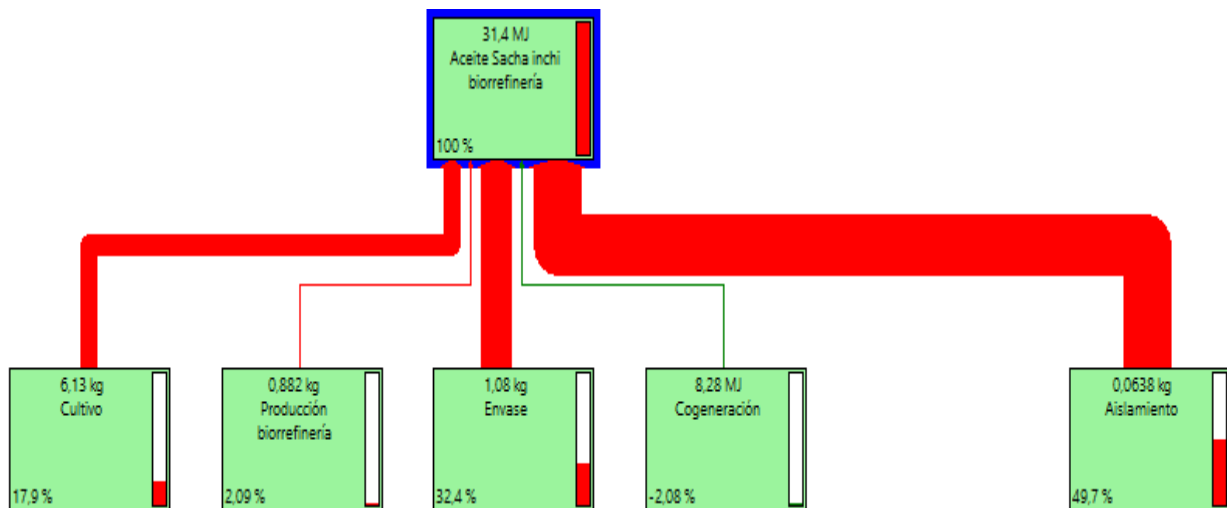
Parámetro Planta	Valor	Unidades
Requerimiento de calor	2369,83	kJ/UF
Residuos	3,30E-2	m ³ /UF
Producción de proteína	6,51 E-2	kg/UF
PCI* proteína	11355,55	kJ/kg

Nota: UF: Unidad Funcional. (*) Estimado a partir de la correlación entre de la exergía de flujo química Ex_{ch} y el poder calorífico; citada por Pantoja Guerrero (2018)

4.3.2.3 Evaluación e Interpretación del ACV de Obtención de Aceite Sacha Inchi bajo

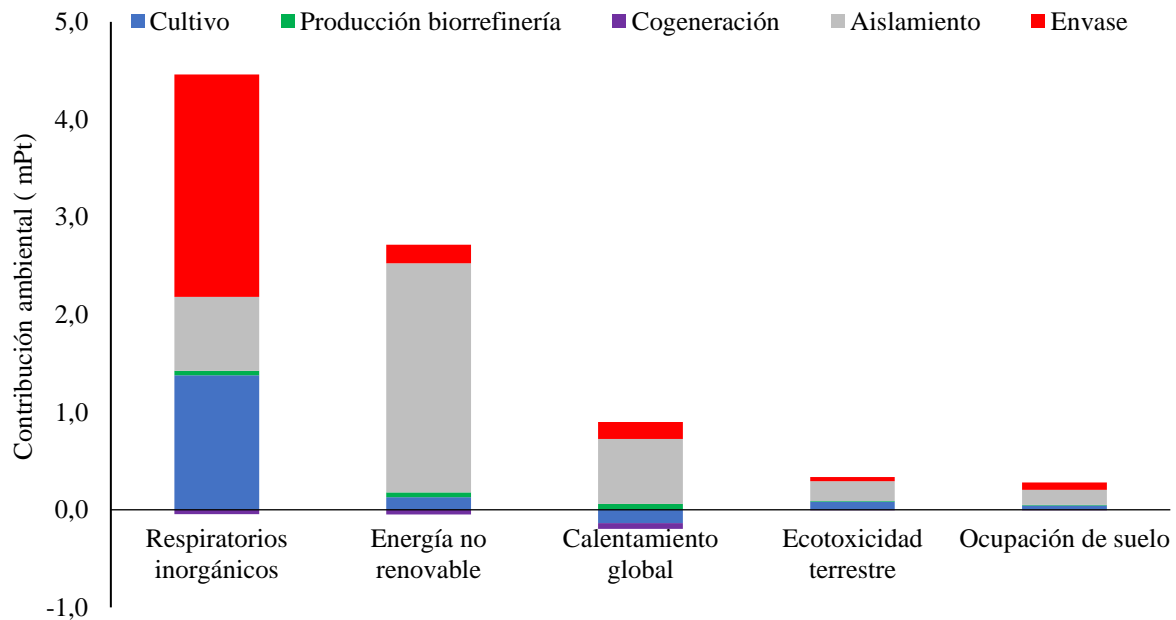
Concepto de Biorrefinería. En la sección, se presentan los resultados referentes a los impactos ambientales originados en el esquema biorrefinería, para el cual se utilizó el método de análisis es *Impact 2002+* y como herramienta computacional el software *SimaPro 9.0*.

4.3.2.3.1 Diagrama de Árbol del Esquema Biorrefinería. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se evidencia la contribución de carga ambiental por etapa evaluada: cultivo (17,9%), producción (2,09%), aislamiento proteico(49,7%) y envase (32,4%); dónde la estrategia de valorización aislamiento presenta el mayor porcentaje de afectación ambiental. En la cogeneración, se visualiza una ruta de color verde, lo que refleja un impacto positivo con un aporte de 2,09%, debido al aprovechamiento energético en la fase de procesamiento (49% del consumo de electricidad del proceso).

Figura 33. Representación del árbol de procesos del esquema biorrefinería

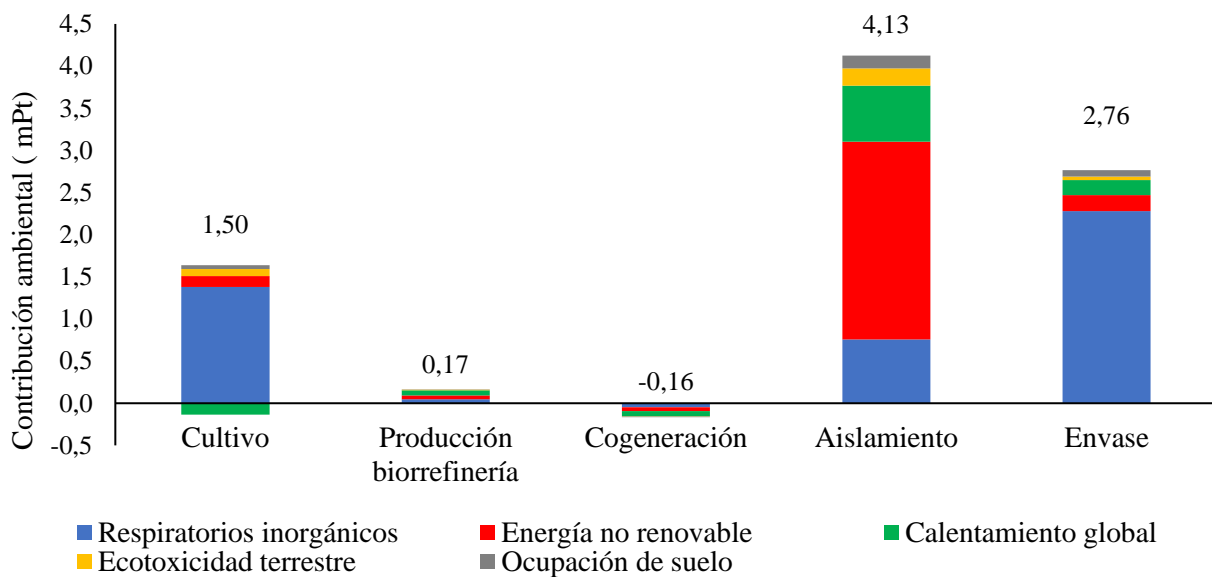
Adoptado del Software SimaPro v 9.0.

4.3.2.3.2 Puntuación Única por Etapas de la Biorrefinería. Los resultados en mPt por etapas en cada una de las categorías de impacto medio se presentan en la Figura 34; en inorgánicos respiratorios con una puntuación de 4,41mPt (53%), energía no renovable con 2,67 mPt (32%), calentamiento global con 0,70 mPt (8%), ecotoxicidad terrestre con 0,33 mPt(4%) y, por último, ocupación del suelo con 0,24 mPt(3%). En la categoría calentamiento global, se reflejan puntuaciones negativas de -0,13mPt y -0,17 mPt en la etapa cultivo y cogeneración respectivamente; ésto debido al mayor consumo de CO₂ de la atmósfera y el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica con fines energéticos.

Figura 34. Evaluación de categorías de impacto medio en las etapas del esquema biorrefinería

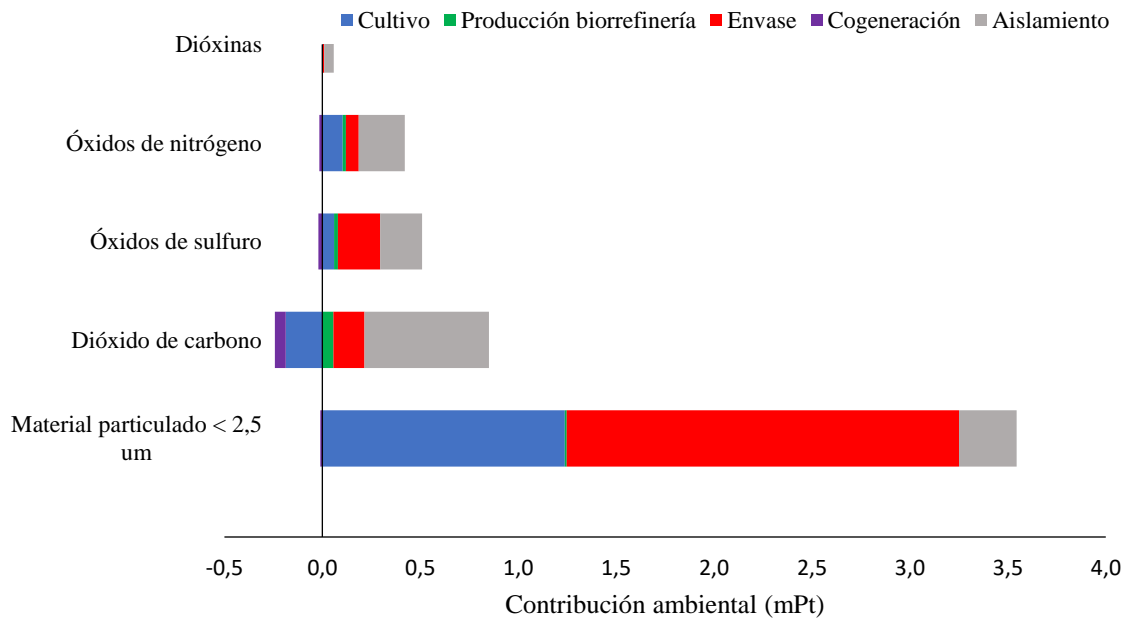
Adoptado del Software SimaPro v 9.0.

Por otra parte, la Figura 35, muestra que la etapa que influye en la categorización del impacto ambiental es el aislamiento proteico con una puntuación de 4,13 mPt, principalmente en energías no renovables con ; la cual está relacionada con el uso de hexano como solvente en la remoción de aceite presente en la torta. Seguido del envase con 2,76mPt y en menor repercusión ambiental, el cultivo con 1,50 mPt, atribuidas en su mayoría, al consumo de diesel.

Figura 35. Puntuación única de impacto ambiental para las etapas del esquema biorrefinería

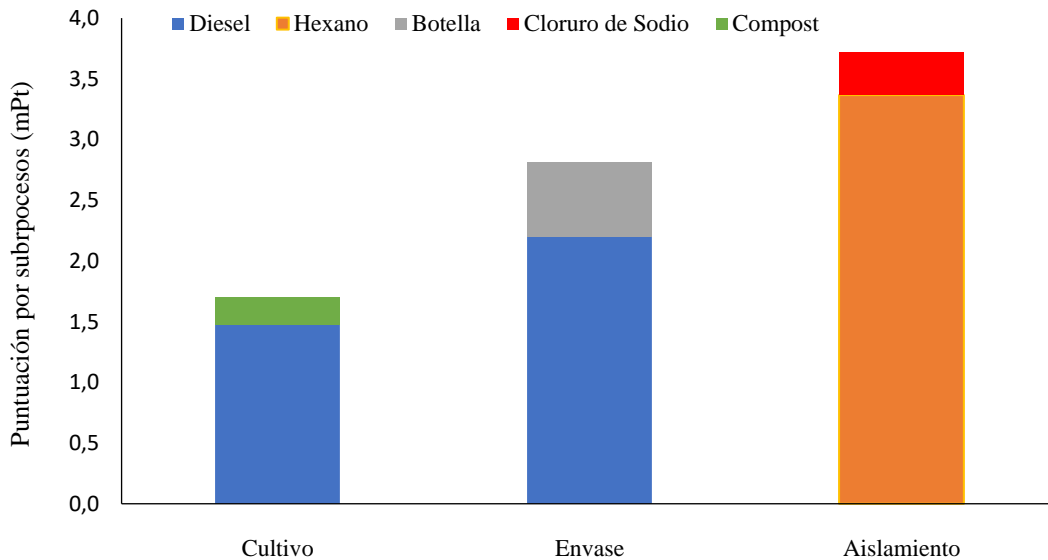
Adoptado del Software SimaPro v 9.0.

4.3.2.2.3 Caracterización de emisiones atmosféricas del Esquema Biorrefinería. Las emisiones generadas del proceso de obtención de aceite bajo concepto de biorrefinería (Figura 36), se ven reflejadas en el material particulado <2,5µm con una contribución de 69,37%, dióxido de carbono con 11,94%, óxidos de sulfuro con 9,60%, óxidos de nitrógeno con 7,94% y las emisiones más bajas en dioxinas con 1,15%. Las emisiones de material particulado se encuentran relacionadas con el tipo de combustible utilizado para el transporte, así mismo con las NOx. Las relacionadas con CO₂, generan un incremento en el cambio climático, ya que, son gases de efecto invernadero que aumentan la temperatura del planeta afectando la salud y el medio ambiente.

Figura 36. Evaluación de emisiones atmosféricas en el esquema biorrefinería

Adoptado del Software SimaPro v 9.0.

4.3.2.2.4 Puntuación Única por Subprocesos del Esquema Biorrefinería. En la Figura 37; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se observa que los subprocesos con mayor contribución de carga ambiental son los diesel (45%) y hexano (41%), seguido de la manufactura de la botella (7%), cloruro de sodio (4%) y por el uso de compost para el área de cultivo (3%). En las etapas cultivo y envase, el consumo de combustible diesel está relacionado con el transporte de semillas y fertilizantes hasta la plantación, además del traslado de la cosecha y botellas hasta la procesadora respectivamente. En el aislamiento, con el uso de hexano en una fase adicional de remoción de aceite. Las etapas producción y cogeneración, no contribuyeron significativamente en el aporte global de carga ambiental, debido al aprovechamiento de biomasa lignocelulósica.

Figura 37. Evaluación por subprocesos de la biorrefinería

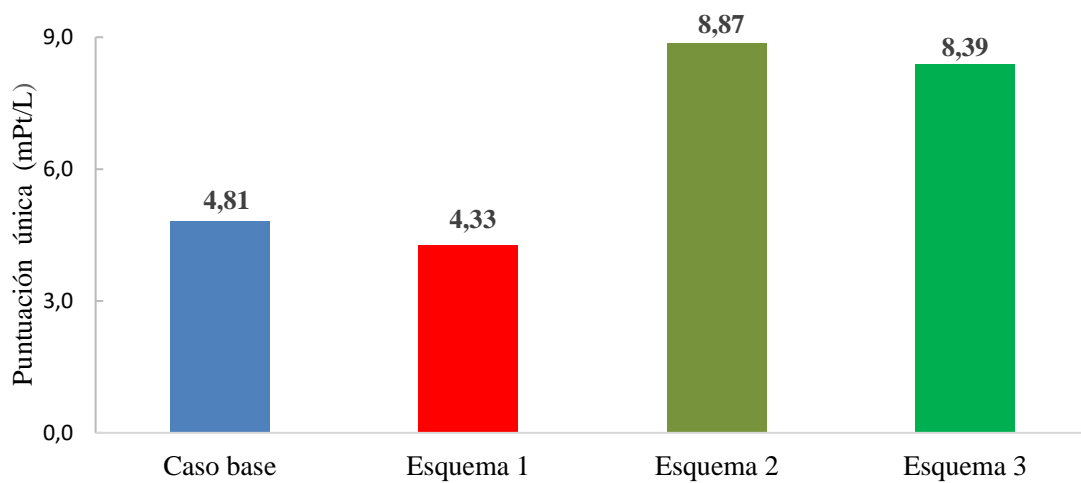
Adoptado del Software SimaPro v 9.0.

4.3.2.2.5 Estimación de La Huella de Carbono del Esquema Biorrefinería. El análisis ambiental de esquema de obtención de aceite con mejoras del proceso también consistió en, la valoración de las emisiones de gases de efecto de invernadero (GEI), utilizando el método IPCC GWP del software *Simapro*. El valor obtenido de la huella de carbono, con una proyección de 20 años, es de 10,17 kg CO₂ equivalente; 2,3 veces superior al estimado para el esquema base, de lo cual se puede deducir que la estrategia de aislamiento proteico contribuye notablemente al cambio climático.

Para efectos de comparación entre los impactos ambientales generados en la obtención de 1L de aceite Sacha inchi; en la Figura 38 se muestran los resultados en mPt, teniendo en cuenta el caso base y los tres posibles esquemas de valorización de corrientes que pueden presentarse: (1)

esquema base con cogeneración, (2) esquema base con aislamiento y (3) esquema base con integración de las dos estrategias.

Figura 38. Resultados de los impactos ambientales del caso base y los posibles esquemas de valorización



Adoptado del Software SimaPro v 9.0.

La Figura 38 evidencia la disminución de 11% de carga ambiental del esquema que implementa la cogeneración (autosuficiencia del 49% de electricidad del proceso). No obstante, el sistema que incluya la estrategia de valorización aislamiento proteico duplica la contribución ambiental del proceso, lo que sustenta ser una fuente de formación de impactos ambientales para la obtención de aceite.

4.3.3 Evaluación Exergoambiental del Esquema Obtención de Aceite Sacha Inchi bajo Concepto de Biorrefinería

Una vez obtenidos los resultados del análisis exergético y la evaluación del ciclo de vida del aceite Sacha inchi, se estimaron de las variables exergoambientales indicadas en las ecuaciones

$$B_{\text{ex},j} = b_j \dot{E}_j \left(12r_{b,k} = \frac{b_{P,k} - b_{F,k}}{b_{F,k}} \right) \quad (16);$$

esto con el fin de evaluar el rendimiento ambiental del esquema biorrefinería.

Para la estimación de las variables exergoambientales, se hallaron los impactos relacionados con las corrientes de procesos intermedios de la transformación en aceite y las estrategias de valorización propuestas, a partir del balance de impactos ambientales a nivel de etapa, tal como se presentó en la Tabla 8 y Tabla 9.

Los resultados del balance de impactos ambientales del esquema biorrefinería se presentan en la Tabla 27, conforme las denotaciones de las corrientes en la Figura 28 y descritos así; el flujo de impacto ambiental (\dot{B}_i) en mPt/h y los impactos ambientales específicos por unidad de exergía (\dot{b}_i) en mPt/GJ. Así mismo, los impactos ambientales asociados con las corrientes de entrada y salida a nivel de etapa. Las corrientes #8 y #8' hacen referencia al consumo de electricidad proveniente de la cogeneración y la red nacional, en la etapa extracción. Se debe agregar que, los relacionados con el aire del ambiente (#15) no fueron considerados en el análisis.

En la Tabla 27 se registra el impacto ambiental en 91,83 mPt por cada 1GJ de electricidad generado (#19) por el sistema de cogeneración, equivalente a 0,33 mPt/ kWh, un dato inferior a los valores de 21.68 mPt/kWh reportado por (Cavalcanti et al.,2020, pp.5-8) y 27.77 mPt/kWh por (Cavalcanti et al.,2019, pp.5-10), en configuraciones que utilizan bagazo de caña de azúcar y eucalipto como combustible respectivamente.

Tabla 27. Resultados del balance de impacto ambientales del esquema biorrefinería

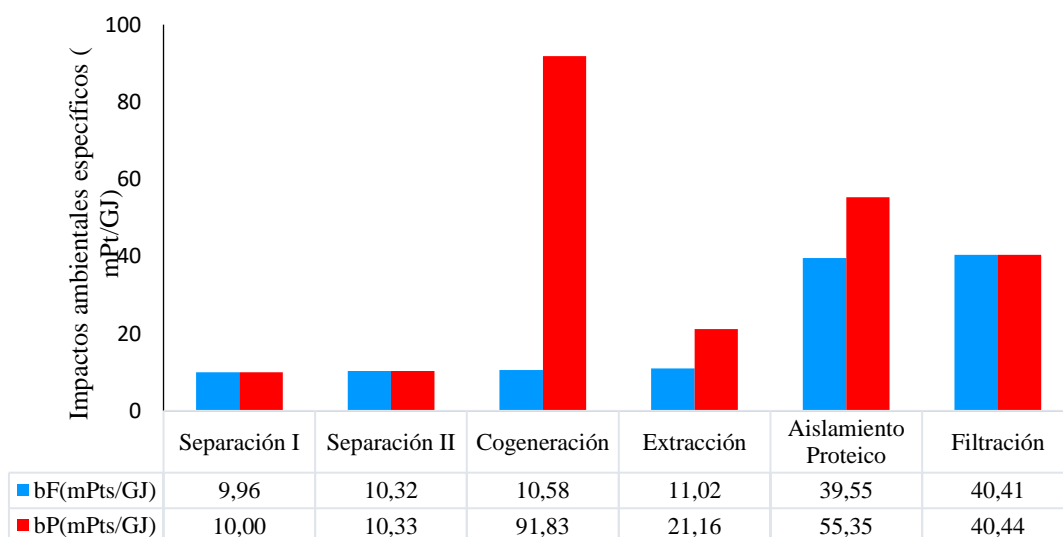
	b	B		b	B
Corriente	(mPt/GJ)	(mPt/h)	Corriente	(mPt/GJ)	(mPt/h)
1	9,96	23,89	15	0	0
2	91,83	0,20	16	4,10	0,07
3	9,96	4,35	17	4,10	1,36
4	10,32	5,86	18	91,83	4,75
5	91,83	0,06	19	91,83	4,66
6	10,32	1,74	20	3,95	22,11
7	4,27	4,17	21	266,44	5,46
8	13,24	1,84	22	425,27	1,24
8'	91,83	4,39	23	77,93	0,10
9	4,27	1,84	24	16,75	5,79
10	40,41	8,56	25	3,95	23,08
11	35,53	0,01	26	4,67	0,62
12	40,41	0,08	27	28,07	11,33
13	40,43	8,49	28	95,67	1,52
14	4,10	6,09			

El resultado de la primera variable \dot{B}_j (tasa de impactos ambientales) para la obtención de 15,93 L/h de aceite en la que se incluye las dos estrategias de valorización, resultó en 60,43mPt/h, lo que

reflejó un aumento considerable (243%) en la carga ambiental en relación con el caso base; ésto debido al uso de reactivos en el aislamiento de la proteína. Mientras que, en el proceso, únicamente con aprovechamiento energético (51% de requerimiento de electricidad del proceso), representó una reducción en un 15% de impactos ambientales con respecto al caso base; lo que sustentó un mejor rendimiento ambiental cuando se valorizan las corrientes estrella y cáscara.

Ahora bien, los resultados de la segunda y tercera variable exergoambiental (ecuaciones $b_{F,k} = \frac{B_{F,k}}{E_{F,k}}$ (13) $b_{P,k} = \frac{B_{P,k}}{E_{P,k}}$ (14), se muestran en la Figura 39, donde los valores de los impactos ambientales específicos de combustible ($b_{f,n}$) y producto ($b_{p,n}$) para cada etapa definida en la biorrefinería, son presentados en el orden de los procesos involucrados en la transformación del fruto en aceite y su correspondiente estrategia de valorización propuesta.

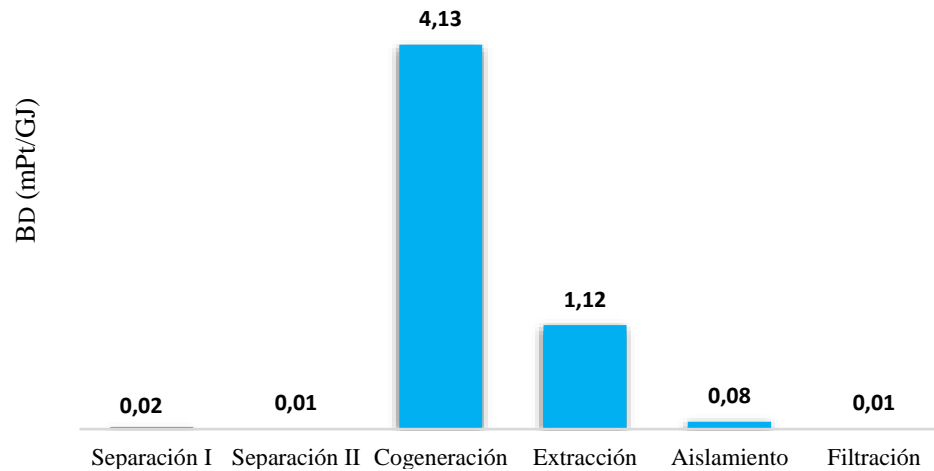
Figura 39. Impacto ambiental específico de combustible y producto en el esquema biorrefinería



En la Figura 39, se evidencia el aumento de los impactos ambientales específicos de combustible y producto dentro del proceso, en contraste con la disminución de exergía que ocurre en la transformación de la materia prima. Los valores están de acuerdo con lo expuesto por (Meyer et al., 2009, pp.86-89); con una relación entre la influencia de la posición relativa de la etapa dentro del sistema y su interconexión con otras; las próximas a la primera separación presentaron valores bajos $b_{f,n}$ y $b_{p,n}$, y las distantes como la filtración presentaron valores más altos, los cuales se estimaron en 40,41 mPt/GJ y 40,44 mPt/GJ respectivamente. Estas magnitudes de la última etapa en la biorrefinería son superiores a los obtenidos en el esquema base: 10,48 y 10,49 mPt; lo que sustenta etapas previas de procesamiento que se adicionaron en la producción de aceite Sacha inchi bajo concepto biorrefinería, como lo son las estrategias de valorización.

Es importante señalar, que en las estrategias de valorización cogeneración y aislamiento proteico, se destacan valores muy altos de impacto ambiental específico de producto en 35,55 mPt/h y 21,43 mPt/h respectivamente, los cuales se atribuyen a las irreversibilidades en la caldera y al uso de hexano y cloruro de sodio que representan una carga ambiental significativa en el proceso.

Por otra parte, los valores de la variable \dot{B}_D asociados con los impactos ambientales debido a las irreversibilidades en cada etapa del proceso, se muestra en la Figura 40; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** La cual se estimó de acuerdo con la ecuación $\dot{B}_{D,k} = b_{F,k} * \dot{E}_{D,k}$ (15).

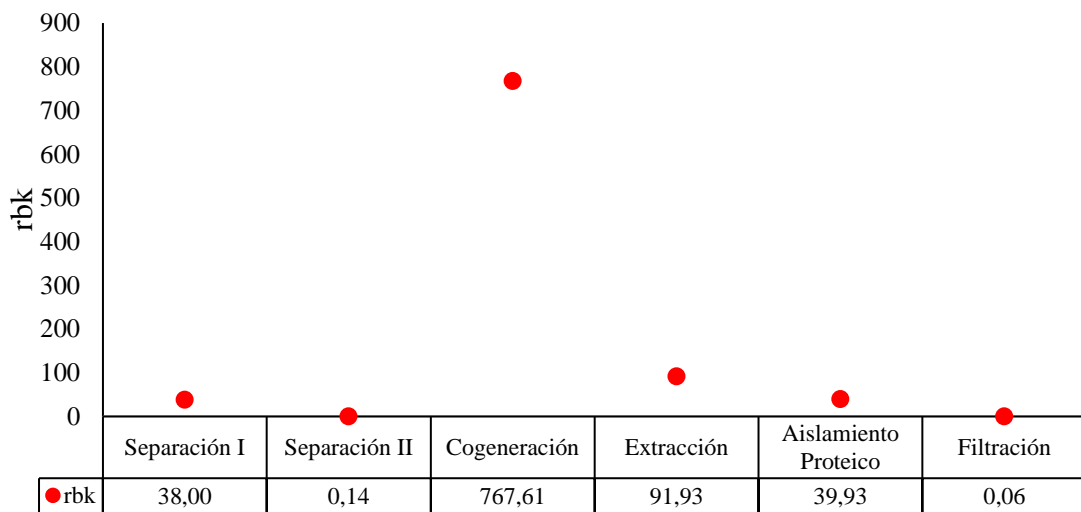
Figura 40. Tasa de impactos ambientales por destrucción de exergía del esquema biorrefinería

La Figura 40, da a conocer, la cogeneración como la mayor fuente de formación en un 77% de los impactos ambientales debido a las irreversibilidades que se generan en el proceso. Seguido de la extracción en un 21% y en menor contribución cerca del 1,5% en el aislamiento proteico. El valor de 4,13 mPt/GJ calculado para el proceso termoquímico, se atribuye a las reacciones químicas y las transferencias de calor con diferencias de temperaturas que tienen lugar en el proceso. Se debe agregar que la alta destrucción de la exergía es inherente a los procesos de combustión. En cuanto a la extracción, las irreversibilidades están relacionados con el alto requerimiento energético de la prensa, lo cual representó el 97% de electricidad consumida en la fase de procesamiento.

Con relación a la última variable $r_{b,k}$, según lo indica la ecuación $r_{b,k} = \frac{b_{P,k} - b_{F,k}}{b_{F,k}}$ (16, representa la diferencia entre el impacto ambiental específico del producto $b_{P,k}$ y del combustible $b_{F,k}$ y se estimó para cada etapa, con la finalidad de identificar el potencial de mejora con respecto

a su desempeño ambiental. Los valores de la variable por cada etapa descrita en la obtención de aceite bajo concepto de biorrefinería se muestran en la Figura 41.

Figura 41. Diferencia relativa de impacto ambiental por etapa del esquema biorrefinería



Los resultados que se presentan en la Figura 41, evidencian un valor r_b , de 7,68 para la etapa cogeneración, superior a las demás etapas; lo que indica que se puede reducir la carga ambiental con un esfuerzo menor. Seguidamente y muy distante de la anterior, se presenta la etapa extracción ($r_{b,k} = 0,92$). Entre tanto, para las etapas restantes (aislamiento proteico, separación I, separación II y la filtración) presentan valores bajos de $r_{b,k}$ ($<0,40$); éstas requieren esfuerzos mayores para mejorar su rendimiento ambiental.

5. Conclusiones

En el proceso de obtención de aceite Sacha inchi bajo concepto biorrefinería propuesto para la valorización de las corrientes intermedias del proceso, se aprovecharon los residuos estrella y cáscara, como material lignocelulósico, en la cogeneración, y la torta residual, en la producción de alimentos funcionales. Dónde presentó el 49% de autosuficiencia energética y la producción de 1 kg/h de concentrado proteico por cada 100 kg de fruto procesado.

A partir del análisis exergético se identificaron las ineficiencias termodinámicas del esquema de procesamiento, la cual reveló la extracción, como la etapa donde se generó el 97,30 % de las irreversibilidades del proceso caso base. De manera semejante, en el esquema biorrefinería, la cogeneración, resultó ser la unidad con mayor destrucción exergética entre todas las etapas (64,27%).

Las etapas aislamiento proteico y envase para la obtención de 1L de aceite Sacha inchi, en el esquema biorrefinería, afectaron en gran medida las categorías de punto medio: respiratorios inorgánicos (53%) y energía no renovable (32%), a causa del consumo de diesel para transporte y el uso de hexano como solvente de extracción de aceite. Por otra parte, el aprovechamiento energético a partir de la cogeneración permitió reducir la carga ambiental del proceso en un 11%.

La metodología de la evaluación exergoambiental es la reconciliación del análisis exergético y ambiental, a través de indicadores de recursos. Su estimación permitió inferir la etapa cogeneración como el proceso que requiere un esfuerzo menor para reducir la carga ambiental del proceso.

Además, la producción de 1GJ de electricidad, utilizando la estrella y la cáscara Sacha inchi como combustible , resultó en un impacto ambiental de 91,83 mPt.

5. Divulgación de Resultados

Se presentaron resultados parciales del proyecto en la convocatoria para la publicación de **Capítulos de Libro en la segunda edición de la Colección de Contribuciones de Investigación de la Universidad Santo Tomás seccional Bucaramanga** en versión digital (Figura 42).

Figura 42. Constancia de presentación en la Convocatoria de Capítulos del Libro USTA



Además, en el **III Congreso Internacional de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Unillanos** Villavicencio - Colombia. Agosto 11 al 13 del 2020. A modalidad de ponencia bajo la presentación oral realizado por videoconferencia (Figura 43).

Figura 43. Constancia de presentación del trabajo en CICI 2020



Villavicencio, 13 de Agosto de 2020

En calidad de Presidentes del Comité Organizador y Científico del
"III Congreso Internacional de Ciencias Básicas e Ingeniería - CICI 2020"

HACEMOS CONSTAR QUE

El trabajo:

ID: 109

Título: *Análisis ambiental del proceso de obtención de aceite Sacha inchi en Santander, Colombia.*

Autores: Nancy González, Viviana Dallos, Claudia Valderrama, Ciro Rozo and Martha Cervantes.

fue presentado como ponencia bajo la modalidad de presentación oral en el "III Congreso Internacional de Ciencias Básicas e Ingeniería - CICI 2020" realizado por videoconferencia desde el Campus Barcelona de la Universidad de los Llanos en la ciudad de Villavicencio - Colombia, evento realizado los días del 11 al 13 de Agosto del presente año.

Cordialmente,

OMAR YESID BELTRÁN GUTIERREZ
Decano FCBI
Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería
Universidad de los Llanos
Email: congresofcbi@unillanos.edu.co

ANGEL ALFONSO CRUZ ROA
Presidente Comité Científico CICI
Facultad de Ciencias Básicas e Ingeniería
Universidad de los Llanos
Email: aacruz@unillanos.edu.co

Por último, también se presentaron los resultados en el **30° Congreso Colombiano de Ingeniería Química** del 23 al 27 de noviembre del año 2020, en modalidad póster con presentación virtual (Figura 44).

Figura 44. Certificado de participación modalidad póster en el 30 Congreso de Ingeniería Química año 2020



6. Recomendaciones

Para futuras investigaciones, se recomienda modelar ciclos de vapor más eficientes, como sistemas de alta presión y presión supercrítica de compresión de vapor, además ciclos combinados de biomasa basados en gasificación. Esto con la finalidad, en primer lugar, ser autosuficientes en energía en un 100% del consumo de la biorrefinería y, luego vender electricidad en la red nacional.

Por otra parte, se propone utilizar tecnologías de aislamiento proteico por vía enzimática, el cual no involucra el uso de solventes químicos que contribuyen a la carga ambiental de la biorrefinería. Adicionalmente, se considera necesario, mejoras en las condiciones de operación de la extracción para reducir el contenido de aceite en la torta residual de la etapa y así evitar el consumo de hexano en una segunda etapa de remoción de aceite.

Referencias

- ABC MACHINERY. (2019). *Conocimiento del aceite Sacha inchi*.
<http://www.bestoilpressmachines.com/quick-links/sacha-inchi-oil-press-machine.html>
- Andi. (2018). *Oportunidades de cogeneración en Colombia*. 2018. <http://www.andi.com.co/>
- Aquino, E. (2015). *Optimización del proceso de extracción de las proteínas de la torta de sachá inchi*. [Tesis de maestría, Tecnología en alimentos]. Universidad Nacional Agraria La Molina.Repositorio Institucional Universidad Nacional Agraria La Molina.
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/1926>
- Avila-sosa, R., Montero-rodríguez, A. F., Aguilar-alonso, P., Vera-lópez, O., Lazcano-hernández, M., Morales-medina, J. C., & Navarro-cruz, A. R. (2019). *Review Article Antioxidant Properties of Amazonian Fruits : A Mini Review of In Vivo and In Vitro Studies*. 2019, 1–12.
- Avila Rojas, O. A. (2015). *Evaluación de impacto ambiental potencial para la producción de polietileno de baja densidad “PEBD”*. [Tesis de maestría, Ingeniería Ambiental]. Universidad Industrial de Santander.
- Ayala, G. (2016). *Análisis de crecimiento y producción de 3 variedades de Sacha Inchi (Plukenetia Volubilis L.), en el municipio de Tena Cundinamarca*. [Tesis de pregrado, Ingeniería Agrónoma]. Universidad de Ciencias ambientales y aplicadas. Repositorio Institucional Universidad Institucional de Ciencias Ambientales y aplicadas.
<https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/487/1/TESIS SACHA INCHI.pdf>
- BEE. (2006). *Cogeneration. In Best Practice Manual*.
https://nredcap.in/PDFs/BEE_manuals/BEST_PRACTICE_MANUAL_COGENERATION.pdf

- Benítez, R., Coronel, C., Hurtado, Z., & Martín, J. (2015). Composición química de la cáscara de sachá inchi (*Plukenetia volubilis*) y alternativas para su aprovechamiento como subproducto agroindustrial. *El Hombre y La Máquina*, 46, 28–32.
- Berrones, W. E. (2017). Diseño de una planta de extracción de aceite vegetal comestible de sachá inchi (*plukenetia volubilis* l) por medio de prensado.[Tesis de pregrado, Ingeniería agroindustrial]. Escuela Politécnica Nacional Facultad De Ingeniería Química Y Agroindustria. Repositorio Institucional Escuela Politécnica Nacional Facultad De Ingeniería Química Y Agroindustria. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18646>.
- Briceño, I., Valencia, J., & Osso, M. (2015). Potencial de generación de energía de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas*, 36(3), 43–53. <http://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/viewFile/11575/11567>
- Bueno-Borges, L. B., Sartim, M. A., Gil, C. C., Sampaio, S. V., Rodrigues, P. H. V., & Regitano-d'Arce, M. A. B. (2018). Sachá inchi seeds from sub-tropical cultivation: effects of roasting on antinutrients, antioxidant capacity and oxidative stability. *Journal of Food Science and Technology*, 55(10), 4159–4166. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3345-1>
- Cavalcanti, E. J. C., Carvalho, M., & da Silva, D. R. S. (2020). Energy, exergy and exergoenvironmental analyses of a sugarcane bagasse power cogeneration system. *Energy Conversion and Management*, 222(July), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113232>
- Cavalcanti, E. J. C., Carvalho, M., & Jonathan, J. L. (2019). Exergoenvironmental results of a eucalyptus biomass-fired power plant. *Energy*, 189, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116188>

- Cervantes, E., & Garza, V. (2012). La cienciometría como herramienta para analizar el impacto de la investigación científica en una región. *Cultura Científica y Tecnológica*, 9(48), 41–49.
- Chacón, J. R. (2008). Historia ampliada y comentada del análisis de ciclo de vida (ACV). *Revista de La Escuela Colombiana de Ingeniería*, 37–70.
- Chirinos, R., Zuloeta, G., Pedreschi, R., Mignolet, E., Larondelle, Y., & Campos, D. (2013). Sacha inchi (*Plukenetia volubilis*): A seed source of polyunsaturated fatty acids, tocopherols, phytosterols, phenolic compounds and antioxidant capacity. *Food Chemistry*, 141(3), 1732–1739. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.04.078>
- Comtrade. (2018). *Base de datos de la Organización de las Naciones Unidas*. <https://comtrade.un.org>
- Cristóbal García-García, J., Marmolejo-Correa, D., Carlos Cárdenas-Guerra, J., & Morales-Rodríguez, R. (2018). Exergy Analysis of an Extractive Distillation Column for Reducing Energy Consumption in a Bioethanol Production Process. In *Computer Aided Chemical Engineering* (Vol. 43, pp. 513–518). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64235-6.50091-7>
- Dincer, I., & Ronsen, M. A. (2013). Exergy and energy analyses. In *In EXERGY: Energy, Environment and Sustainable Development* (2nd ed., p. 24).
- Dincer, I., Rosen, M. A., & Al-Zareer, M. (2018). Análisis exergoambiental. In *Comprensión de Sistemas de energía* (Vols. 1–5, pp. 377–421). Elsevier Ltd.
- Fanali, C., Dugo, L., Cacciola, F., Beccaria, M., Grasso, S., Dachà, M., Dugo, P., & Mondello, L. (2011). Caracterización química del aceite Sacha Inchi(*Plukenetia volubilis* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(24), 13043–13049. <https://doi.org/10.1021/jf203184y>

- FECOC. (2016). *Calculadora de Emisiones UPME*. 2016. http://www.upme.gov.co/Calculadora_Emisiones/aplicacion/ayuda.html
- Fedebiocombustibles. (2010). *Asocaña :Fuente de energía para Colombia*. <https://www.fedebiocombustibles.com/nota-web-id-796.html>
- Fertisol S.A.S. (2020). *Abonos Orgánicos*. 2020. <https://organicosfertisol.com/nuestra-empresa-fertisol.html>
- Filippo, A., & Antonioli, F. (2013). *Sacha Inchi. Investigación sobre las condiciones para el reconocimiento de la indicación geográfica en el Perú*. 1–127.
- Flores, S., Flores, A., Calderón, C., & Obregón, D. (2019). *Synthesis and characterization of sacha inchi (Plukenetia volubilis L .) oil- based alkyd resin*. *136*(July), 1801–1810.
- Follegatti-Romero, L. A., Piantino, C. R., Grimaldi, R., & Cabral, F. A. (2009). Supercritical CO₂ extraction of omega-3 rich oil from Sacha inchi (Plukenetia volubilis L.) seeds. *Journal of Supercritical Fluids*, *49*(3), 323–329. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2009.03.010>
- Gonzalez, R. (2016). *Simulación del proceso de gasificación de biomasa*. [Tesis de maestría, Ingeniería Mecánica]. Universidad EAFIT.Repositorio Institucional Universidad EAFIT. <https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/11878>
- Gourmelon, S., Théry-Hétreux, R., & Floquet, P. (2017). A systematic approach: Combining process optimisation exergy analysis and energy recovery for a better efficiency of industrial processes. *International Journal of Exergy*, *23*(4), 298–329. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2017.086169>
- Guarino, F., Falcone, G., Stillitano, T., De Luca, A. I., Gulisano, G., Mistretta, M., & Strano, A. (2019). Life cycle assessment of olive oil: A case study in southern Italy. *Journal of*

- Environmental Management*, 238, 396–407. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.006>
- Gutiérrez, L. F., Rosada, L. M., & Jiménez, Á. (2011). Composición química de la semilla de Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) y características de la fracción lípida. *Grasas y Aceites*, 62(1), 76–83.
- Gutiérrez, N., Saá Arévalo, I. A., & Vinuesa Lozada, Fabián, A. (2017). Diseño y construcción de un prototipo para la extracción continua de aceite de la semilla Sacha Inchi con un proceso de prensado en frío. *Enfoque UTE*, 2, 15–32. <http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/>
- Haya, E. (2016). *Análisis de Ciclo de Vida Master*. Master En Gestion Ambiental. https://static.eoi.es/savia/documents/teoria_acv_migma1.pdf
- Hincapié, L. (2016). Modelamiento del proceso de extracción de aceite de Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L) por solventes. *Universidad Tecnológica de Pereira*, 147, 11–40.
- Hosseini, S. S., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Younesi, H., & Najafpour, G. (2015). Exergy analysis of biohydrogen production from various carbon sources via anaerobic photosynthetic bacteria (*Rhodospirillum rubrum*). *Energy*, 93, 730–739. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.060>
- Hurtado, Z. A. (2013). *Análisis composicional de la torta y aceite de semillas de Sacha inchi (plukenetia volubilis) cultivada en Colombia*. [Tesis de maestría, Ciencias Biológicas]. Universidad Nacional de Colombia. Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/21717/7609501.2013.pdf?sequence=1>
- IDAE. (2007). Biomasa: Producción eléctrica y cogeneración. In *Besel. Sa*. <https://www.idae.es/publicaciones/biomasa-produccion-electrica-y-cogeneracion>

- IPCC. (2006). *Inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>
- Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework. International Organization for Standardization, (2006).
- Jolliet, O., Saade-Sbeih, M., Shaked, S., Jolliet, A., & Crettaz, P. (2016). *Environmental Life Cycle Assessment* (Taylor&Fra).
- Khanali, M., Mousavi, S. A., Sharifi, M., Keyhani Nasab, F., & Chau, K. wing. (2018). Life cycle assessment of canola edible oil production in Iran: A case study in Isfahan province. *Journal of Cleaner Production*, 196, 714–725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.217>
- Kodahl, N. (2020). Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.)—from lost crop of the Incas to part of the solution to global challenges? *Planta*, 251(4), 1–22. <https://doi.org/10.1007/s00425-020-03377-3>
- Kumar, B., Smita, K., Cumbal, L., & Debut, A. (2016). One pot synthesis and characterization of gold nanocatalyst using Sacha inchi (*Plukenetia volubilis*) oil: Green approach. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 158, 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.02.023>
- Kumar, B., Smita, K., Sánchez, E., Stael, C., & Cumbal, L. (2016). Andean Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) shell biomass as new biosorbents for Pb²⁺ and Cu²⁺ ions. *Ecological Engineering*, 93, 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.034>
- Lakkhana, C., Atong, D., & Sricharoenchaikul, V. (2017). Fuel Gas Generation from Gasification of Sacha Inchi Shell using a Drop Tube Reactor. *Energy Procedia*, 138, 870–876. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.109>

- Lazzaretto, A., & Tsatsaronis, G. (2006). SPECO: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. *Energy*, *31*(8–9), 1257–1289. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.03.011>
- Mercado R., J. L., Elías P., C. C. A., & Pascual C., G. J. (2015). Protein isolated from cake of Sacha Inchi (*Plukenetia Volubilis* L.) and evaluation of its techno-functionals properties. *Anales Científicos*, *76*(1), 160–167. <https://doi.org/10.21704/ac.v76i1.777>
- Meyer, L., Tsatsaronis, G., Buchgeister, J., & Schebek, L. (2009). Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems. *Energy*, *34*(1), 75–89. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.07.018>
- Minambiente. (2018). *Reporte: área, producción y rendimiento nacional por cultivo*. 2018. <https://www.agronet.gov.co>
- Morozyuk, T., Tsatsaronis, G., & Koroneos, C. (2016). Environmental impact reduction using exergy-based methods. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 118, pp. 1–20). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.064>
- NREL. (2008). *Biomass research*. 2008. <https://www.nrel.gov/biomass/>
- Promperú.(2011).*Mapeo tecnológico de sachá inchi*. Repositorio institucional Promperú. <https://repositorio.promperu.gob.pe/handle/123456789/1067>
- Özilgen, M., & Sorgüven, E. (2011). *Utilización de energía y exergía, y emisión de dióxido de carbono en la producción de aceite vegetal*. *36*(July 2010), 5954–5967. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.020>
- Palacios-Bereche, R., & Nebra, S. A. (2009). Thermodynamic modeling of a cogeneration system for a sugarcane mill using Aspen-Plus, difficulties and challenges. *20th International*

Congress of Mechanical Engineering, 1–9.

Quintero, V. (2018). *Modelamiento, integración y evaluación exergética de la producción conjunta de bioetanol de primera, segunda y tercera generación, a partir de caña de azúcar y biomasa*. [Tesis doctoral, Ingeniería Química]. Universidad Industrial de Santander. Base de datos Universidad Industrial de Santander. http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/pags/cat/popup/pa_detalle_matbib.jsp?parametros=184282|%20|1|8

Rawdkuen, S., Murdayanti, D., Ketnawa, S., & Phongthai, S. (2016). Chemical properties and nutritional factors of pressed-cake from tea and sacha inchi seeds. *Food Bioscience*, 15, 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2016.05.004>

Rawdkuen, S., Rodzi, N., & Pinijsuwan, S. (2018). Characterization of sacha inchi protein hydrolysates produced by crude papain and Calotropis proteases. *Food Science and Technology*, 98(August), 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.08.008>

Restrepo, A. (2012). *Metodología de análisis exergoambiental de plantas termoeléctricas operando en combustion combinada con biomasa*. [Tesis doctoral, Ingeniería Química]. Universidad Federal de Santa Catarina. Repositorio Institucional Universidad federal de Santa Catarina. <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/100434>

Revista Dinero. (2019). *La planta que le quita terreno a la coca en Colombia*. 2019. <https://www.dinero.com>

Rocha, D. H. D. (2019). *Análise Exergoambiental de Centrais Termelétricas Supercríticas e Ultrassupercríticas*. [Tesis de maestría, Ingeniería Mecánica]. Universidad Federal de Itajubá. Repositorio Institucional Universidad Federal de Itajubá.

<http://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/1945>

Rodriguez, L. (2020). *Aislamiento de la proteína a partir del residuo sólido de la sachá inchi (Plukenetia volubilis linneo)*. [Tesis pregrado, Química ambiental]. Universidad Santo Tomas seccional Bucaramanga. Repositorio Universidad Santo Tomás.

<https://repository.usta.edu.co/handle/11634/23229>

SachaColombia. (2018). *Manual Técnico-Social: Producción Agrícola e industrialización del Cultivo del SacháInchi, mediante un Ecosistema Agroindustrial Inclusivo en Red*.

<https://sachacolombia.com/>

SachaColombia, C. (2019). *El cultivo en Colombia..* <http://www.sachacolombia.com/>

Salehi, N., Mahmoudi, M., Bazargan, A., & McKay, G. (2018). Exergy and Life Cycle-Based Analysis. In *Handbook of Environmental Materials Management* (pp. 1058–1077).

https://doi.org/10.1007/978-3-319-58538-3_84-2

Sathe, S. K., Hamaker, B. R., Sze-Tao, K. W. C., & Venkatachalam, M. (2002). Isolation, purification, and biochemical characterization of a novel water soluble protein from Inca peanut (*Plukenetia volubilis* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(17), 4906–4908. <https://doi.org/10.1021/jf020126a>

Szargut, J. (2007). *Egzergia. Poradnik obliczania I stosowania*. Politechniki Śląskiej.

Taldea, M. M. (2009). Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. *Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental.*, 1–36.

Yáñez A, E., Silva L, E., Venturini, O., & Ugaya, C. (2008). Análisis de sensibilidad de la cogeneración utilizando biomasa en el análisis de ciclo de vida del biodiésel de aceite de palma. *Palmas*, 29(4), 47–56.

Zuleta, E. C., Rios, L. A., & Benjumea, P. N. (2012). Oxidative stability and cold flow behavior of palm, sacha-inchi, jatropha and castor oil biodiesel blends. *Fuel Processing Technology*, *102*, 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.04.018>

Apéndices

Apéndice A. Caracterización fisicoquímica de las corrientes principales de la obtención de aceite Sacha inchi

Para el ingreso de componentes de las corrientes en la simulación, se realizó la caracterización fisicoquímica a la semilla, cáscara, almendra y al residuo sólido de la extracción de aceite (torta) por técnicas analíticas de la Norma Técnica de Colombia (NTC) reportado por Rodríguez, (2020), tal como se reporta en la tabla 28.

Tabla 28. Composición porcentual de la semilla, cáscara, almendra y torta

	semilla	cáscara	almendra	torta
Grasas ^a (%)	33,40±0,6	0,40±0,1	56,70±0,4	26,50±6,0
Fibra cruda ^b (%)	17,70±2,1	76,50±1,12	3,40±0,3	5,50±0,44
Proteína ^c (%)	21,00±0,5	5,60±1,3	27,70±0,4	48,50±0,6
Ceniza ^d (%)	2,50±0,2	1,60±0,2	2,70±0,2	4,00±1,2
Humedad (%)	2,20 ±0,2	0,40±0,03	4,50±0,34	7,00±0,13
Carbohidratos ^f (%)	23,20	15,50	5,00	8,50

Nota: ^a (NTC 4969). ^b (NTC 5122). ^c (NTC 4657). ^d (NTC 4648). ^e (NTC 4888). ^f se determinaron por cálculo (FAO, 1997).

Apéndice B. Estimación de cambio de uso suelo

Se consideró el aumento en la reserva del carbono en el suelo y la biomasa porque el uso de la cobertura natural de la zona de plantación cambió en los últimos 3 años al pasar de un sistema ganadero “pasturas” a tierras de cultivo. A continuación, en la tabla 29 se observa la información descrita para la estimación del cambio del uso del suelo.

Tabla 29. Información para la estimación del cambio de uso de suelo

País	Colombia
Cultivo perenne	Sacha Inchi
Tipo clima	Montano, Tropical
Tipo de suelo	Suelos con arcilla de alta actividad
Intensidad de labranza	Bajo
Nivel de entradas al cultivo	Media, con aplicación de fertilizantes
Cobertura vegetal previa	pastura

Nota: Adoptado de IPCC (2006) versión *Refinement 2019*.

En la tabla 30 se presenta la absorción o emisión negativa de la atmósfera representativa del aumento de las existencias de carbono en la biomasa y suelo, así como los factores de emisión IPCC (Plan Intergubernamental de cambio climático) según el método Nivel 1 para suelos minerales a partir del cual se hicieron los cálculos.

Tabla 30. *Parámetros para el cambio en el uso directo de la tierra para el cultivo Sacha inchi*

IPCC cambio en el uso la tierra	Antes (Pasturas) ton C/ha	Después (sacha inchi) ton C/ha
AGB *	3,0	6,38
BGB **	1,13	2,30
SOC **	51	53,57
Facto de uso del suelo (FLU)	1,01	
Factor de manejo (FMG)	1,04	
Factor de entrada (FI)	1	
Total	55,13	62,30
Cambio anual de existencia de carbono (ton C/ha)		7,13
Tiempo (años)		20
ton C /ha año		0,36
ton CO ₂ /ha año		1,3
kg fruto /ha año		2743
kg CO ₂ / kg fruto		0,47
Emissiones kg CO ₂ / L aceite		-2,98

Nota: * Biomasa por encima del suelo ** Biomasa por debajo del suelo ***Reserva en el carbono del suelo

Apéndice C. Exergía química específica de compuestos químicos

En la tabla 31, se da a conocer, las exergías químicas específicos de los componentes de las corrientes del esquema del proceso, estimadas a partir de la ecuación y determinantes en el cálculo de la exergía de corriente.

Tabla 31. Exergía química específicas de las componentes de las corrientes del proceso.

Componente	Exergía específica química (kJ/mol)
Trilinoléico ^c	33926,63
Trilinoleico ^c	34569,16
Trioleico ^c	35211,73
Tripalmitina ^c	31947,37
Triestearina ^c	35852,72
Lignina ^b	3449,53
Celulosa ^b	3404,43
Hemicelulosa	2826,64
Proteína	145,60
Carbohidratos	4010,49
Ceniza ^a	0,50
Agua ^b	0,89
Oxígeno ^b	3,97
Nitrógeno ^b	0,72
Dióxido de carbono ^b	19,40
Hexano ^c	4137,47
Cloruro de sodio ^b	14,30
Ácido cítrico ^c	2509,29
Alcohol etílico ^b	1356,90

Nota : Adaptado de ^(a) Cristóbal García-García, Marmolejo-Correa, Carlos Cárdenas-Guerra, & Morales-Rodríguez(2018), ^(b) Szargut(2007) ^(c) Estimada de acuerdo con lo propuesto por Hosseini, Aghbashlo, Tabatabaei, Younesi, & Najafpour(2015).

Apéndice D. Balance de masa del proceso obtención de aceite caso base

En la siguiente tabla se muestra las composiciones de los flujos en kg/h de las corrientes del esquema de procesamiento definido caso base.

Tabla 32. *Composiciones del flujo del esquema base de obtención aceite Sacha inchi*

Flujo componentes (kg/h)									
Corriente	1	3	4	6	7	9	10	12	13
Trilinoléico	9,73	0,09	9,63	0,04	9,60	3,07	6,53	0,00	6,53
Trilinoleico	7,24	0,07	7,17	0,03	7,14	2,28	4,86	0,00	4,86
Trioleico	1,77	0,02	1,75	0,01	1,74	0,56	1,19	0,00	1,19
Tripalmítico	0,85	0,01	0,84	0,00	0,84	0,27	0,57	0,00	0,57
Triesteárico	0,64	0,01	0,63	0,00	0,63	0,20	0,43	0,00	0,43
Lignina	15,11	10,65	4,46	4,12	0,34	0,32	0,02	0,02	0,00
Celulosa	25,78	18,17	7,61	7,03	0,58	0,55	0,03	0,03	0,00
Hemicelulosa	10,67	7,52	3,15	2,91	0,24	0,23	0,01	0,01	0,00
proteína	13,14	2,66	10,48	1,03	9,45	9,18	0,27	0,27	0,00
Agua	1,80	0,19	1,61	0,07	1,54	1,19	0,35	0,00	0,35
Ceniza	1,98	0,76	1,22	0,29	0,92	0,92	0,00	0,00	0,00
Carbohidratos	11,30	7,36	3,94	2,85	1,09	0,67	0,42	0,00	0,42

Apéndice E. Resultados de la simulación en Aspen Plus para la cogeneración y aislamiento proteico en el esquema de biorrefinería

Las tablas 33- 35, dan a conocer, las composiciones de flujo y datos termodinámicos de las corrientes involucradas en la cogeneración y aislamiento proteico, como estrategias de valorización dentro del esquema de biorrefinería.

Tabla 33. *Composiciones de flujo de la caldera etapa cogeneración.*

Corriente	Componentes del flujo (kg/h)					
	E-1	E-33	14	15	16	17
Trilinoléico	0	0	0,13	0	0	0
Trilinoleico	0	0	0,09	0	0	0
Trioleico	0	0	0,02	0	0	0
Tripalmitico	0	0	0,01	0	0	0
Triesteárico	0	0	0,01	0	0	0
Lignina	0	0	14,77	0	0	0,30
Celulosa	0	0	25,20	0	0	0,50
Hemicelulosa	0	0	10,43	0	0	0,21
proteína	0	0	3,69	0	0	3,69
Agua	175,09	175,09	0,26	0	34,619	0,000
Ceniza	0	0	1,05	0	1,05	1,93E-8
Carbohidratos	0	0	10,21	0	0	10,21
O2	0	0	0	90,52	9,9	0
N2	0	0	0	298,14	298,14	0
CO2	0	0	0	0	96,05	2,37E-05

Tabla 34. *Datos termodinámicos de las corrientes en la turbina etapa cogeneración*

Corriente	m (kg/h)	T (° C)	P (atm)	h (kJ/h)	S (kJ/kg-K)
E-1	175,10	510,00	66,12	-2181670,85	-2,50
E-2	87,55	510,00	66,12	-1090835,42	-2,50
E-3	87,55	510,00	66,12	-1090835,42	-2,50
E-4	87,55	344,47	16,78	-1121012,94	-2,37
E-5	26,26	344,47	16,78	-336303,88	-2,37
E-6	61,28	344,47	16,78	-784709,06	-2,37
E-7	87,55	146,88	2,47	-1155048,76	-2,24
E-8	26,26	146,88	2,47	-346514,63	-2,24
E-9	61,28	146,88	2,47	-808534,13	-2,24
E-11	55,93	146,88	2,47	-737892,41	-2,24
E-12	26,26	45,80	0,10	-357323,48	-1,96
E-13	26,26	45,80	0,10	-356894,06	-1,91
E-14	52,53	45,80	0,10	-714217,54	-1,94
E-15	52,53	45,80	0,10	-828790,27	-8,78
E-16	52,53	45,87	2,06	-828774,91	-8,78
E-17	63,11	305,03	16,78	-813130,17	-2,50
E-18	63,11	189,17	2,47	-827519,14	-2,05
E-19	122,35	135,47	2,47	-1616820,59	-2,29
E-20	122,35	102,00	2,47	-1900298,96	-8,07
E-21	119,83	102,00	2,47	-1861139,82	-8,07
E-22	2,52	102,00	2,47	-39159,14	-8,07
E-23	55,05	48,54	2,06	-867934,05	-8,74
E-24	55,05	48,55	2,22	-867932,80	-8,74

Corriente	m (kg/h)	T (° C)	P (atm)	h (kJ/h)	S (kJ/kg-K)
E-25	2,52	25,00	1,00	-39996,94	-9,06
E-26	62,93	97,79	1,00	-978571,37	-8,13
E-27	3,31	97,79	1,00	-51410,85	-8,13
E-28	3,31	97,91	2,47	-51409,04	-8,12
E-29	59,62	97,79	1,00	-927160,52	-8,13
E-30	1,83	97,79	1,00	-28425,64	-8,13
E-31	1,83	98,34	16,78	-28421,11	-8,12
E-32	57,79	97,79	1,00	-898734,88	-8,13
E-33RE	57,79	100,21	71,06	-898098,28	-8,10
E-36	2768,29	25,00	1,00	-43916989,57	-9,06
E-37	2768,29	35,00	1,00	-43802416,73	-8,92
E-38	6848,79	25,00	1,00	-108651368,82	-9,06
E-39	6848,79	35,00	1,00	-108367890,19	-8,92

Tabla 35. *Composiciones de las corrientes principales de la etapa aislamiento proteico*

Componentes de flujo (kg/h)									
Corriente	9	20	21	23	24	25	26	27	28
Trilinoléico	3,07	0	0	0	0	3,01	0,06	0	7,37E-04
Trilinoleico	2,28	0	0	0	0	2,24	0,05	0	5,48E-04
Trioleico	0,56	0	0	0	0	0,55	0,01	0	1,34E-04
Tripalmítico	0,27	0	0	0	0	0,26	0,01	0	6,43E-05
Triesteárico	0,20	0	0	0	0	0,20	0,00	0	4,86E-05
Lignina	0,32	0	0	0	0	0	0,28	0,05	1,23E-03
Celulosa	0,55	0	0	0	0	0	0,47	0,08	2,10E-03
Hemicelulosa	0,23	0	0	0	0	0	0,19	0,03	8,67E-04
proteína	9,18	0	0	0	0	0	5,50	2,72	0,96
Agua	1,19	0	349,36	0	132,51	0	348,03	135,04	7,77E-03
Ceniza	0,92	0	0	0	0	0	0,46	0,44	1,88E-02
Carbohidratos	0,67	0	0	0	0	0	0,13	0,49	5,03E-02
O ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0
N ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CO ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0
H ₂ O	0	117,00	0	0	0	117,00	0	0	0
NaCl	0	0	46,24	0	0	0	46,24	0	0
Ácido Cítrico	0	0	0	0,10	0	0	0	0,10	0
Etanol	0	0	0	0	11,62	0	0	11,62	0