



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“POTENCIALES IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS
GENERADOS EN EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL
BIOCOMBUSTIBLE 2,5 DIMETILFURANO, OBTENIDO A PARTIR
DE RESIDUOS DE CABUYA (*Agave americana* L.)”**

Tesis para optar el título profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Presentado por:

Lizbet Rosa Márquez Roca (0000-0001-8383-8551)

Asesor:

Elvito Fabián Villegas Silva (0000-0001-9783-1641)

Lima – Perú

2021

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 10 de diciembre 2021.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Mg. Ing. Mirtha Rosario Nazario Ramirez
Miembro: Dra. Gladys Rosario Ramos Yacasi
Miembro: Dra. Susan Mery Medina Canzio

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:

"POTENCIALES IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS GENERADOS EN EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL BIOCMBUSTIBLE 2,5 DIMETILFURANO, OBTENIDO A PARTIR DE RESIDUOS DE CABUYA (Agave americana L.)"

Presentada por la/el estudiante/bachiller:

- **Lizbet Rosa Márquez Roca**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesorado por: Dr. Ing. Elvito Fabian Villegas Silva

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño del estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental a en la sustentación, concluyen de manera unánime (x) por mayoría simple () calificar a:

Tesis: Lizbet Rosa Márquez Roca			Nota (Quince): (15)
Aprobado (x)	Aprobado - Muy buena ()	Aprobado - Sobresaliente ()	Desaprobado ()

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.



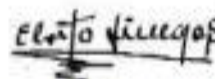
Mg. Ing. Mirtha Rosario Nazario Ramirez
Presidente



Dra. Gladys Rosario Ramos Yacasi
Miembro 1



Dra. Susan Mery Medina Canzio
Miembro 2



Dr. Ing. Elvito Fabian Villegas Silva
Asesor

DEDICATORIA

Dedico esta investigación principalmente a mi familia, por su apoyo incondicional en todo momento, especialmente a mi hijo Alessandro, que a su corta edad ha sabido comprender mi ausencia física en diversos momentos y que representa el centro de mi fortaleza y la razón más importante para seguir adelante en la vida y alcanzar mis metas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios en primer lugar por todos los días de mi vida y por permitirme continuar en este gran camino de conocimiento y aprendizaje continuo, por ser mi guía en los momentos más difíciles y porque en su presencia pude encontrar paz y tranquilidad.

Expreso un agradecimiento muy especial a mi asesor de Tesis, el Dr. Elvito Fabián Villegas Silva, por todo su apoyo y conocimientos esenciales para el desarrollo de esta investigación, así también agradezco a todas aquellas personas, entre ellos familiares, docentes, especialistas, compañeros de la carrera de Ingeniería Ambiental, por brindarme un poco de su tiempo y comprensión.

INDICE GENERAL

I.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
II.	MARCO TEÓRICO	10
1.	Biocombustibles	11
1.1.	Biocombustibles a nivel mundial	
1.2.	Biocombustibles en el Perú	
1.3.	Tipos de biocombustibles	
1.4.	Cálculo de emisiones debido a la combustión	
2.	Cabuya (<i>Agave americana</i> L.)	20
2.1.	Partes de la Cabuya (<i>Agave americana</i> L.)	
3.	Análisis del Ciclo de Vida (ACV)	25
3.1.	Fases de un ACV	
4.	Análisis de Incertidumbre	26
4.1.	Análisis de Monte Carlo	
4.2.	Análisis mediante matriz de Pedigree	
III.	OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACION	30
1.	Objetivo General	30
2.	Objetivos Específicos	30
3.	Hipótesis general	31
IV.	METODOLOGÍA	31
1.	Tipo de Investigación	31
2.	Población	31
3.	Muestra y Muestreo	31
4.	Técnica de Procesamiento y Análisis de Datos	32
4.1.	Análisis de Sensibilidad	
5.	Procedimiento para la obtención del biocombustible 2,5 DMF	33
5.1.	Etapa de extracción y recolección de biomasa residual	
5.2.	Etapa de transporte	
5.3.	Etapa de transformación o conversión de biomasa	
5.4.	Etapa de uso (combustión)	
6.	Selección de métodos y categorías de impacto	51
V.	RESULTADOS	52
1.	Análisis de laboratorio realizados para el AVC del biocombustible 2,5 DMF	52
1.1.	Resultados del análisis de calidad del suelo zona 1 "Cultivos de Cabuya"	
1.2.	Resultados del análisis de calidad del suelo zona 2 "Cultivos de Locales"	
1.3.	Resultados del análisis para determinar metales en el extracto puro de Cabuya (<i>Agave americana</i> L.)	
1.4.	Resultados del análisis para determinar azúcares en el extracto puro de Cabuya (<i>Agave americana</i> L.)	
1.5.	Resultados del análisis del extracto hidrolizado de Cabuya (<i>Agave americana</i> L.)	
1.6.	Resultados del análisis de la muestra deshidratada	
2.	Fases del ACV del 2,5 DMF	58
2.1.	Fase 1 Definiciones	
2.2.	Fase 2 Análisis de Inventario	

2.3. Fase 3 Evaluación de Impacto Ambiental	
3. Variabilidad de los impactos en el sistema desarrollado	69
4. Análisis de Incertidumbre	70
4.1. Análisis de Monte Carlo	
4.2. Incertidumbre de la calidad de datos mediante matriz de Pedigree	
5. Análisis de sensibilidad (escenarios propuestos)	72
5.1. Cuantificación y variabilidad de los impactos bajo escenarios propuestos	
5.2. Comparación de impactos ambientales del sistema desarrollado y los escenarios propuestos	
VI. DISCUSION DE RESULTADOS	76
1. Análisis de la calidad del suelo zonas 1 y 2	76
2. Análisis en el extracto de Cabuya (<i>Agave americana</i> L.)	77
3. Análisis de Impactos en categoría Calentamiento Global	77
4. Análisis de impactos en método Recipe-2016	78
5. Análisis de impactos por método Demanda de Energía Acumulada	81
6. Variabilidad de impactos bajo el sistema desarrollado	81
7. Variabilidad y comparación de los impactos ambientales en los escenarios evaluados	82
VII. CONCLUSIONES	83
VIII. RECOMENDACIONES	85
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87
X. ABREVIATURAS	98
XI. ANEXOS	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Planta de Cabuya (<i>Agave americana</i> L.) encontrada en el área de estudio	21
Figura 2: Hojas de Cabuya (<i>Agave americana</i> L.) recolectadas en el área de estudio	22
Figura 3: Inflorescencia de Cabuya (<i>Agave americana</i> L.) recolectada en área de estudio	22
Figura 4: Simulación de Monte Carlo	27
Figura 5: Ubicación del área de estudio	34
Figura 6: Diagrama esquemático del proceso de conversión de fructosa a 2,5 DMF	40
Figura 7: Diagrama esquemático de la ruta de obtención del biocombustible 2,5 DMF	49
Figura 8: Diagrama de Flujo de los procesos unitarios considerados en el ciclo de vida del biocombustible 2,5 DMF	50
Figura 9: Límites del sistema del ciclo de vida del biocombustible 2,5 DMF	59
Figura 10: Diagrama de Red del biocombustible 2,5 DMF analizado mediante categoría Calentamiento Global (Método IPCC-2013)	65
Figura 11: Aporte porcentual por cada proceso intermedio a las categorías de impacto del sistema desarrollado mediante Método Recipe-2016	68

Figura 12: Comparación de emisiones totales entre el sistema desarrollado y EP N° 1	74
Figura 13: Comparación de Impactos al agua entre el sistema desarrollado y EP N°2	75
Figura 14: Comparación de consumo de energía fósil entre el sistema desarrollado y EP N° 3	76

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación de las propiedades de combustibles	15
Tabla 2 Factores de emisión por defecto de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O	18
Tabla 3 Consumo de combustible típico por km y categoría de vehículo	19
Tabla 4 Valor calórico neto de combustibles	19
Tabla 5 Valor Calórico Neto y densidad de combustible aéreo	20
Tabla 6 Factores de emisión de CO ₂ , CH ₄ y N ₂ O del transporte aéreo	20
Tabla 7 Fases de un Análisis de Ciclo de Vida	26
Tabla 8 Matriz de Pedigree	29
Tabla 9 Factores de incertidumbre aplicados a la matriz de Pedigree	30
Tabla 10 Escenarios propuestos para la evaluación de impactos ambientales	33
Tabla 11 Ubicación de los puntos de muestreo	35
Tabla 12 Vehículos y combustibles empleados en el transporte de la biomasa residual	36
Tabla 13 Factor de emisión resultante de los combustibles empleados	37
Tabla 14 Emisiones de GEI por tramo recorrido en el transporte de biomasa residual	37
Tabla 15 Transporte de insumos importados	38
Tabla 16 Consumo de combustible estimado según hoja de cálculo AEMA	39
Tabla 17 Emisiones de GEI por tipo de transporte para los insumos importados	39
Tabla 18 Cantidad de compuestos requeridos para reacción de hidrogenólisis	45
Tabla 19 Consumo específico gravimétrico de combustibles evaluados	47
Tabla 20 Emisiones específicas de NO _x , THC, CO y CO ₂	48
Tabla 21 Emisiones de GEI específicas generadas por la combustión de 1 L de cada combustible	48
Tabla 22 Métodos y categorías de impacto ambiental seleccionadas	51
Tabla 23 Análisis de calidad de suelos zona 1 "Cultivos de Cabuya"	52
Tabla 24 Análisis de calidad de suelos zona 2 "Cultivos Locales"	54
Tabla 25 Análisis para determinar metales en extracto puro de Cabuya (<i>Agave americana</i> L.)	55
Tabla 26 Análisis para determinar azúcares en extracto puro de Cabuya (<i>Agave americana</i> L.)	57
Tabla 27 Análisis del extracto hidrolizado	57
Tabla 28 Análisis de la muestra deshidratada	58
Tabla 29 Resumen de los flujos de entrada por cada producto intermedio del sistema desarrollado	60

Tabla 30 Resumen de los flujos de salida por cada producto intermedio del sistema desarrollado	61
Tabla 31 Cuantificación de emisiones totales del sistema desarrollado	63
Tabla 32 Emisiones de GEI generadas por la combustión de 1 L de cada combustible	66
Tabla 33 Cuantificación de los impactos en el agua por el sistema desarrollado	69
Tabla 34 Cuantificación del consumo de energía fósil del sistema desarrollado	69
Tabla 35 Variabilidad de impactos al aire, agua y energía del sistema desarrollado	70
Tabla 36 Simulación de Monte Carlo para los impactos ambientales caracterizados del sistema desarrollado	71
Tabla 37 Análisis de Incertidumbre de calidad de datos para el potencial de Calentamiento Global del sistema desarrollado	72
Tabla 38 Variabilidad de impactos al aire, agua y energía bajo escenarios propuestos	73

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Tomas fotográficas del procedimiento experimental	99
Anexo 2. Traslado de la biomasa residual	112
Anexo 3. Transporte de insumos importados	113
Anexo 4. Constancia N° 298-USM-2019 del Museo de Historia Natural	115
Anexo 5. Informe de Ensayo N° 1-08129/19 Análisis calidad de suelos zona 1	116
Anexo 6. Informe de Ensayo N° 1-08130/19 Análisis calidad de suelos zona 2	117
Anexo 7. Parámetros de calidad de suelos proporcionados por CERPER S.A.	118
Anexo 8. Informe de Ensayo N° 1-08045/19 Análisis de metales por ICP	119
Anexo 9. Informe de Ensayo N° 1-08304/19 Análisis de azúcares por HPLC	121
Anexo 10. Informe Técnico N° 2150-19-LABICER Análisis de fructosa por HPLC	122
Anexo 11. Informe Técnico N° LAB.21-20-018 Análisis de HMF por Cromatografía FID	124
Anexo 12. Rango de incertidumbre de los impactos ambientales caracterizados mediante simulación de Monte Carlo	125

Resumen

La investigación tuvo como objetivo la determinación y análisis de los impactos ambientales generados en el ciclo de vida del biocombustible 2,5 Dimetilfurano (DMF), obtenido a partir de hojas de Cabuya (*Agave americana* L.). La metodología aplicada se basó en la NTP ISO 14040:2017 y la NTP ISO 14044:2019, la Unidad Funcional estudiada fue 1 L de biocombustible. Además, se evaluaron tres Escenarios Propuestos (EP) empleando el software de cálculo SimaPRO y los métodos de análisis fueron: IPCC-2013 Cambio Climático, Recipe-2016 y Demanda de Energía Acumulada.

Los resultados fueron: emisiones al aire 243 605.48 kg CO₂-eq, impactos en el agua 0.006 kg P-eq, 0.106 kg SO₂-eq, 194.48 kg 1,4 DCB, 4.55 m³ de agua y consumo de energía fósil 665.01 MJ. En el EP N° 1 las emisiones se redujeron hasta 149.64 kg CO₂-eq. En el EP N° 2 los valores se incrementaron a 0.026 kg P-eq, 0.287 kg SO₂-eq, 231.19 kg 1,4 DCB y 6.56 m³ de agua y en el EP N° 3 se redujo el consumo de energía fósil a 87.18 MJ.

Durante el ciclo de vida del biocombustible 2,5 DMF se producen impactos ambientales negativos que afectan tanto al aire, agua y energía. La identificación de los procesos críticos permitió plantear escenarios, a fin de evaluar la variabilidad de los impactos, contribuyendo así al desarrollo de procesos productivos ambientalmente sostenibles con enfoque de economía circular en materia de biocombustibles de segunda generación.

Palabras clave: Biomasa, Análisis del Ciclo de Vida (ACV), biocombustible 2,5 DMF, Cabuya (*Agave americana* L.), impactos ambientales.

Abstract

The objective of the research was to determine and analyze the environmental impacts generated in the life cycle of the biofuel 2,5 Dimethylfuran (DMF), obtained from Cabuya leaves (*Agave americana* L.). The applied methodology was based on the NTP ISO 14040: 2017 and the NTP ISO 14044: 2019, the Functional Unit studied was 1 L of biofuel. In addition, three Proposed Scenarios (EP) were evaluated using the SimaPRO calculation software and the analysis methods were: IPCC-2013 Climate Change, Recipe-2016 and Accumulated Energy Demand

The results were: air emissions 243 605.48 kg CO₂-eq, impacts on water 0.006 kg P-eq, 0.106 kg SO₂-eq, 194.48 kg 1.4 DCB, 4.55 m³ of water and consumption of fossil energy 665.01 MJ. In EP N ° 1, emissions were reduced to 149.64 kg CO₂-eq. In EP N ° 2 the values increased to 0.026 kg P-eq, 0.287 kg SO₂-eq, 231.19 kg 1.4 DCB and 6.56 m³ of water and in EP N ° 3 the consumption of fossil energy was reduced to 87.18 MJ.

During the life cycle of the 2.5 DMF biofuel there are negative environmental impacts that affect both air, water and energy. The identification of the critical processes made it possible to propose scenarios in order to evaluate the variability of the impacts, thus contributing to the development of environmentally sustainable production processes with a circular economy approach in the field of second generation biofuels.

Keywords: Biomass, Life Cycle Analysis (LCA), 2.5 DMF biofuel, Cabuya (*Agave americana* L.), environmental impacts.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El consumo de energía desde finales del siglo XIX hasta la actualidad, se ha incrementado aproximadamente 50 veces, debido en gran parte al aumento de la población mundial, que supera actualmente los 7000 millones de habitantes. Asimismo, la mayor demanda de energía, ocasiona el agotamiento de los combustibles fósiles (Viñals *et al.*, 2012; Pérez, 2016; Sikarwar *et al.*, 2017). En efecto, el uso de combustibles fósiles corresponde actualmente al 80% de la energía total usada en el mundo, de la cual 32% recae en el petróleo, 21% en gas y 27% en carbón (Ferrari, 2013; Sikarwar *et al.*, 2017). En consecuencia, este elevado consumo de energía fósil, produce mayores emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmosfera (Hallgren *et al.*, 2013).

En relación a la necesidad de encontrar nuevas fuentes de energía renovables y limpias, la atención mundial se ha enfocado en los recursos de la biomasa (Kaushik y Singh, 2016). Asimismo, el creciente interés en la producción de biocombustibles se ajusta a las nuevas políticas energéticas de Estados Unidos y la Unión Europea, las cuales requieren de un cierto grado de dependencia de energía renovable, como una medida para reducir las emisiones de gases y partículas contaminantes al aire, generadas por el sector transporte (Langholtz *et al.*, 2014; Rulli *et al.*, 2016).

Los diversos métodos empleados en la conversión de la biomasa, incluyen procesos térmicos y bioquímicos, que liberan energía en forma de calor, electricidad y también generan biocombustibles líquido o gas (Kaushik & Singh, 2016). La producción de biocombustibles a gran escala ha generado cierta oposición, debido al empleo de cultivos alimenticios como materia prima (González & Castro, 2013). En ese sentido, se han desarrollado sistemas

productivos que utilizan biomasa lignocelulósica para generar energía sin afectar la seguridad alimentaria, ocasionando en función del tiempo una reducción de la disponibilidad de carbono orgánico en los suelos (Monforti *et al.*, 2015), siendo los residuos agrícolas la fuente que provee de nutrientes esenciales al suelo (Pérez, 2016).

Las hojas de Cabuya (*Agave americana* L.) representan una importante opción como materia prima secundaria para la generación de biocombustibles, debido a que dicha planta puede resistir bajas temperaturas y condiciones climáticas adversas (Rivera, 2016), estas grandes ventajas permitieron el uso integral del Agave por los pueblos indígenas del Perú, quienes obtuvieron diversos productos como hilos, redes de pesca, tejados, cercos, agujas, chancaca, jarabes curativos, entre otros (Pineda y Uribarri, 2014).

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) constituye una herramienta muy útil para evaluar los impactos ambientales de las alternativas energéticas, debido a que no solo toma en cuenta las emisiones producidas en la combustión, sino también considera los impactos generados en todas las etapas que comprenden su producción (Arvesen *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2017). La presente investigación busca determinar y analizar los potenciales impactos ambientales negativos generados durante el ciclo de vida del biocombustible 2,5 DMF, obtenido a partir de hojas de Cabuya (*Agave americana* L.).

II. Marco Teórico

Estados Unidos alcanzó en el año 2012 una producción de cerca de 57 billones de litros de etanol anhidro a partir de cultivos de maíz, en el año 2016 las emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) registraron valores 145% más elevados

en comparación con la era preindustrial, debido principalmente a las actividades antropogénicas que demandan el uso de combustible fósil y a los cambios de uso del suelo (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2017). Aquellos hechos originaron que las políticas se enfocaran en promover el uso de cultivos no alimenticios como materia prima, principalmente biomasa residual o lignocelulosa (Langholtz *et al.*, 2014). Para aprovechar estos recursos, Estados Unidos proyecta para el año 2022 incrementar su producción en 136 billones de litros de biocombustible, de los cuales aproximadamente 56 billones de litros provendrían de cultivos no alimenticios (Muth *et al.*, 2013).

El consumo de energía en el Perú para el sector transporte tuvo un incremento de 6.9% en el año 2016 respecto al año 2015, lo cual se debió principalmente al consumo de diésel y petróleo. Se registró un aumento de las emisiones de CO₂ en el periodo 2013-2016 con una variación de 33.4 a 37.9 mil millones de kg de CO₂ (MINEM, 2016).

1. Biocombustibles

1.1. Biocombustibles a nivel mundial

Los principales exportadores de biocombustibles en el mundo son: EEUU, Brasil y la Unión Europea, los cuales emplean cultivos energéticos como maíz, caña de azúcar y aceites vegetales, generando de esta manera impactos en los medios de subsistencia, seguridad alimentaria y agua (Raman *et al.*, 2014). En el caso de Latinoamérica, Brasil alcanzó una producción a escala industrial de bioetanol a partir de la caña de azúcar de aproximadamente 29.35 millones de litros en el 2015. Argentina obtuvo en el mismo año, una producción de biodiesel de soya de más de 2 mil millones de litros y Colombia mediante el desarrollo de la industria de bioetanol y biodiesel logró una producción de 406 mil millones de

litros de etanol a partir de la caña de azúcar y 606 mil millones de litros de biodiesel a partir de la palma aceitera en el 2014 (Vásquez *et al.*, 2016).

El empleo de mezclas de biocombustibles con gasolinas y diésel ha impulsado su uso como aditivos, generando así efectos positivos, debido a que la materia prima necesaria para producir algunos de los principales biocombustibles, pueden ser cultivadas en suelos degradados o en reemplazo de cultivos utilizados para la obtención de productos ilegales. En consecuencia, se generarían importantes beneficios sobre la calidad de aire, debido a que los biocombustibles reciclan el CO₂ emitido mediante el cultivo de su materia prima. (Ramos *et al.*, 2016; Vásquez *et al.*, 2016).

1.2. Biocombustibles en el Perú

A nivel nacional se cuenta con normas técnicas que promueven el desarrollo de los biocombustibles, tales como la Ley N° 28054 de fecha 8 de agosto del 2003, Ley que promueve el mercado de los biocombustibles y su Reglamento aprobado con Decreto Supremo N° 013-2005-EM. Asimismo, se cuenta con el Decreto Supremo N° 021-2007-EM de fecha 18 de abril del 2007, que aprueba el Reglamento para la comercialización de biocombustibles.

Dentro de este marco legal nacional, el Perú empezó a producir bioetanol de caña de azúcar a partir del año 2009, alcanzando una producción aproximada de 240 millones de litros en el año 2010, además logró una producción de 97.3 mil barriles de etanol carburante y 0.6 mil barriles de biodiesel B100 en el año 2016 (MEM, 2016). Sin embargo, este escenario se vió opacado, debido a que la mayor parte de la tierra utilizada para los proyectos de biocombustible en el

valle de Chira, Piura, tuvo que ser transformada a tierra agrícola, lo cual ocasionó gran presión sobre la oferta del agua en la región (Urteaga, 2013).

En materia de biocombustibles a pesar de la normatividad vigente, todavía nos queda mucho por investigar y profundizar en cuanto a los proyectos de generación de biocombustibles, debido a que es necesario establecer políticas claras y concertadas que promuevan el desarrollo de biocombustibles de manera sostenible, siendo un riesgo el impacto que tienen sobre la tierra y los recursos hídricos, dado que el Perú no cuenta con medidas de carácter regulatorio, que incluyan parámetros ambientales relacionados a la disponibilidad de agua para los cultivos energéticos en suelos frágiles (Urteaga, 2017).

1.3. Tipos de biocombustibles

a. De Primera generación

Los biocombustibles de primera generación son conocidos también como biocombustibles convencionales y se producen actualmente a escala industrial por países como Estados Unidos, Brasil y la Unión Europea, se obtienen a partir de la transformación de cultivos energéticos (azúcares comestibles o aceites). Entre los más comercializados, se tiene el bioetanol, el cual es producido por medio del proceso de fermentación, a partir de cultivos de caña de azúcar, maíz, remolacha, entre otros. Asimismo, el biodiésel es generado mediante el proceso de transesterificación, en el cual se mezclan los aceites y grasas provenientes de plantas oleaginosas con alcohol, generando ésteres grasos (Acosta, 2012; Alejos y Calvo, 2015; Ramos, 2016).

b. De Segunda generación o lignocelulósicos

Los biocombustibles de segunda generación están constituidos por biomasa que no representa riesgo para los cultivos alimenticios, debido a que utilizan residuos agrícolas y forestales (Acosta, 2012; Pérez, 2016). Los componentes principales de la biomasa lignocelulósica son: la celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales inicialmente fueron empleados como alimento de animales. Sin embargo, en la actualidad poseen múltiples aplicaciones a nivel industrial, especialmente en la producción de combustibles líquidos de segunda generación (Hackenberg, 2014; Viñals *et al.*, 2012).

La producción de biocombustibles de segunda generación incorpora diversos procesos tecnológicos, tal es el caso del bioetanol que emplea el proceso de hidrólisis enzimática para liberar los azúcares reductores. Asimismo, la producción de biodiesel utiliza el proceso de Fischer -Tropsch para transformar la biomasa en gas (Morelos, 2016).

Biocombustible 2,5 Dimetilfurano (DMF)

El 2,5 DMF es un derivado furánico que se encuentra actualmente en investigación, además ha alcanzado mayor interés como biocombustible de segunda generación, debido a sus propiedades fisicoquímicas y a las nuevas rutas de producción más sostenibles (Alexandrino *et al.*, 2017). Entre las propiedades más resaltantes se encuentran, su alto índice de octanaje y baja solubilidad en agua (ver Tabla 1) (Sindhu *et al.*, 2019). Por tanto, la estrategia de la industria química “verde” se enfoca en conseguir rutas de conversión directa de la biomasa a 2,5 DMF, debido a que gran parte de los combustibles líquidos utilizados en el transporte, podrían obtenerse de recursos renovables (Ji *et al.*, 2019)

Tabla 1

Comparación de las propiedades de combustibles

Propiedades	Etanol	Gasolina	2,5 DMF
Formula molecular	C ₂ H ₆ O	C ₂ -C ₁₄	C ₆ H ₈ O
Masa molecular (kg/kmol)	46.07	100-105	96.13
Índice de Octano (RON)	107-110	95.80-96.80	101-119
Densidad a 20°C (kg/L)	0.79	0.75	0.89
Solubilidad en agua (g/L) a 25 °C	Muy soluble	insoluble	Insoluble < 1.47
Contenido de oxígeno gravimétrico (%)	34.78	0	16.67
Temperatura de auto-ignición °C	423	257	285.85
Densidad energética (MJ/L)	23	32.20	31.50

Nota. Adaptado de “Una revisión completa del 2,5 Dimetilfurano como candidato a biocombustible: Innovaciones más allá del bioetanol”, por H. Xu y C. Wang, 2019, *Biocombustibles de biomasa Lignocelulósica*.

En relación a la toxicidad del 2,5 DMF, estudios demuestran que no es mutagénico ni genotóxico, pero sus componentes intermedios pueden presentar mayor toxicidad que el propio DMF. Asimismo, en cuanto a su persistencia, bioacumulación y toxicidad acuática, se encontró que el 2,5 DMF presenta niveles moderados. Respecto al impacto biológico, no se encontraron asociaciones directas a enfermedades. (Phuong *et al.*, 2012).

El 2,5 DMF ha sido estudiado a nivel nacional por Lozano (2012), en su artículo titulado “Estudio de pre-factibilidad para la producción de 2,5-DMF como biocomponente energético renovable y limpio para mejorar el octanaje de los biocombustibles de Refinería Talara – PETROPERÚ S. A.”, en el cual determinó que el 2,5 DMF es un biocombustible renovable y limpio debido a que se produce a partir de la biomasa, es hidrofóbico, por lo que no contamina el agua y evita su difusión al ambiente. Asimismo, es biodegradable en el suelo y además necesita 1/3 menos de energía para su evaporación en comparación con el etanol.

Ventajas de los biocombustibles de segunda generación

Las principales ventajas que poseen los biocombustibles de segunda generación frente a los biocombustibles de primera generación están relacionadas a la materia prima utilizada, puesto que los primeros emplean cultivos no alimenticios (biomasa lignocelulósica), a diferencia de los biocombustibles de primera generación que utilizan cultivos energéticos (Nogués *et al.*, 2010). Asimismo, los biocombustibles de segunda generación presentan una mayor ganancia neta de energía, poseen bajas emisiones y una gran diversidad de materia prima (Hackenberg, 2014; Sindhu *et al.*, 2019).

Potenciales Impactos Ambientales generados por los biocombustibles de segunda generación

Las emisiones GEI por el uso de biocombustibles no siempre resultan ser menores que las producidas en la quema de los combustibles fósiles, debido a que también se generan emisiones a lo largo de su ciclo de vida (Sikarwar *et al.*, 2017). Se considera tanto las emisiones producidas en la combustión, como los impactos generados en todas las etapas que comprenden su producción (Arvesen *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2017). Asimismo, la extracción de los residuos agrícolas a gran escala para la producción de energía tiende a generar preocupación por la disponibilidad del carbono orgánico en los suelos (Monforti *et al.*, 2015).

La cuantificación de los impactos generados en el ciclo de vida de los biocombustibles de segunda generación podría tener una variación considerable respecto a los impactos reales, debido en muchos casos a supuestos

considerados en el análisis y a las decisiones tomadas durante el ciclo de vida del biocombustible (Raman *et al.*, 2014).

c. De tercera generación

Los biocombustibles de tercera generación son aquellos que se obtienen a partir de algas, las cuales presentan importantes ventajas frente a los otros tipos de biocombustibles, debido a que son una de las materias primas más abundantes del planeta, poseen una elevada cantidad de lípidos, son capaces de fijar CO₂, no requieren de un suelo fértil para su cultivo y son de crecimiento rápido (Machado, 2010; Sikarwar *et al.*, 2017; Sindhu *et al.*, 2019).

1.4. Calculo de emisiones debido a la combustión

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) han elaborado una serie de lineamientos que ayudan a calcular las emisiones de GEI debido a la quema de combustibles en diversos medios de transporte. En ese sentido, se presentan las ecuaciones y datos necesarios para llevar a cabo la estimación de las emisiones generadas por el transporte terrestre y aéreo:

a. Emisiones debido al transporte terrestre

El cálculo de las emisiones debido al transporte terrestre cuando no están disponibles los contenidos de carbono específicos del país, se puede realizar empleando la Ecuación de Nivel 1 y los Factores de Emisión (FE) por defecto para la combustión móvil, descritos en la Enmienda 2019 de las Directrices del IPCC-2006 para los Inventarios Nacionales de GEI (ver Tabla 2).

Ecuación (1): Ecuación de Nivel 1 para el cálculo de emisiones

$$\text{Emisiones} = \sum_a [\text{Combustible}_a \times \text{FE}_a]$$

Nota. Tomado de “Enmienda 2019 de las Directrices del IPCC 2006 para los Inventarios Nacionales de GEI”, por IPCC, 2019.

Donde:

Emisiones = expresadas en (kg)

FE_a = Factor de emisión del combustible (kg/TJ)

Combustible_a = Combustible vendido (TJ) (se considera igual al combustible quemado o consumido)

a = Tipo de combustible a (diésel, gasolina, gas natural, GLP, etc.)

Tabla 2

Factores de emisión por defecto de CO₂, CH₄ y N₂O

Tipo de combustible	CO ₂ (kg/TJ)	CH ₄ (kg/TJ)	N ₂ O (kg/TJ)
Gasolina para motores	69 300	3.8	5.7
Diésel	74 100	3.9	3.9

Nota. Adaptado de “Enmienda 2019 de las Directrices del IPCC 2006 para los Inventarios Nacionales de GEI”, por IPCC, 2019.

El combustible consumido (TJ) se determina mediante la Ecuación 2, para lo cual es preciso conocer el consumo de combustible típico de acuerdo a la categoría del vehículo y tipo de combustible utilizado (ver Tabla 3). Asimismo, para aplicar la ecuación es necesario tener el dato del Valor Calórico Neto (VCN) de los combustibles empleados (ver Tabla 4).

Ecuación (2):

$$\text{Combustible}_{\text{consumido}}(\text{TJ}) = (\text{Dato de actividad}(\text{kg})) \left(\text{VCN} \left(\frac{\text{TJ}}{\text{kg}} \right) \right)$$

Nota. Tomado de “Enmienda 2019 de las Directrices del IPCC 2006 para los Inventarios Nacionales de GEI”, por IPCC, 2019.

Donde:

Dato de la actividad: Combustible consumido (kg)

VCN= Valor Calórico neto del combustible empleado (TJ/kg)

Tabla 3

Consumo de combustible típico por km y categoría de vehículo

Categoría de vehículo	Combustible	Consumo de combustible típico (g/km)
Vehículo de pasajeros	Gasolina	70
	Diésel	60
Vehículo de carga ligero	Gasolina	100
	Diésel	80
Vehículo pesado carga/ pasajeros	Gas Natural	500
	Diésel	240

Nota. Adaptado de “Guía de Inventario de Emisiones de contaminantes del aire/ Energía/ Combustión/ Transporte por carretera 2019”, por AEMA, 2019.

Tabla 4

Valor calórico neto de combustibles

Tipo de combustible	VCN	Unidad
Gasohol 90	0.04	GJ/kg
Biodiesel DB5	0.04	GJ/kg

Nota: Adaptado de “Reporte Anual de GEI del sector Energía 2016, Categoría: Combustión Móvil”, por Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), 2020.

b. Emisiones debido al transporte aéreo

Las directrices elaboradas por el IPCC y la AEMA para determinar las emisiones debido al transporte aéreo requieren para su aplicación de información sobre el VCN y los FE por defecto del tipo de combustible utilizado para avión (ver Tabla 5 y Tabla 6).

Ecuación (3): Ecuación de Nivel 1 para Aviación

$$\text{Emisiones} = \text{Combustible consumido} \times \text{FE}$$

Nota. Tomado de “Enmienda 2019 de las Directrices del IPCC 2006 para los Inventarios Nacionales de GEI”, por IPCC, 2019.

Donde:

Emisiones = expresadas en (kg)

FE = Factor de emisión del combustible (kg/TJ)

Combustible consumido = en unidades de energía (TJ)

Tabla 5

Valor Calórico Neto y densidad de combustible aéreo

Tipo de combustible	VCN (MJ/kg)	Densidad (kg/L)
Turbo A1	43	0.81

Nota. Adaptado de "Reporte Anual de GEI del sector Energía 2016, Categoría: Combustión Móvil", por MTC, 2020.

Tabla 6

Factores de Emisión de CO₂, CH₄ y N₂O del transporte aéreo

Tipo de combustible	FE CO ₂ (kg/TJ)	FE CH ₄ (kg/TJ)	FE N ₂ O (kg/TJ)
Queroseno para motor de reacción	71 500	0.5	2

Nota. Adaptado de "Enmienda 2019 de las Directrices del IPCC 2006 para los Inventarios Nacionales de GEI", por IPCC, 2019.

2. Cabuya (*Agave americana* L.)

El Agave es un género de plantas nativas del continente americano (Canadá, Estados Unidos, México, América Central y los Andes Sudamericanos), se desarrolla aproximadamente entre los 800 a 3700 m.s.n.m. y existe mayor variedad de especies en México (Rivera, 2016). Debido a su característica xerófila, muestra gran adaptabilidad a las condiciones climáticas y edáficas desfavorables, concentra una gran fuente de recursos naturales como: fibra, fructanos y productos medicinales (De La Torre *et al.*, 2016).

La Cabuya (*Agave americana* L.) es conocida con el nombre de maguey, pita, chauchau, entre otros. En el Perú crece y se desarrolla en forma silvestre

encontrándose en los departamentos de Cajamarca, Huánuco, Huancavelica y Ayacucho. Asimismo, las condiciones climáticas existentes en estas zonas favorecen su crecimiento, siendo cultivada en algunos lugares por los pobladores para su consumo local (ver Figura 1) (Cervantes e Inga, 2015).

Figura 1

Planta de Cabuya (Agave americana L.) encontrada en la zona de estudio



En relación a sus características físicas esta especie posee tronco corto, hojas largas suculentas, espinas laterales y terminales para incrementar la captación y direccionamiento del agua de lluvia hacia el centro, dispone de una cabeza cilíndrica, raíz primaria y secundaria (ver Figura 2) (Cervantes & Inga, 2015). Las hojas están conformadas por el 68.6% de los carbohidratos que contiene la cabeza (Montañez *et al.*, 2011). Las hojas del género *Agave* presentan una alta cantidad de azúcares complejos, en comparación con otros cultivos energéticos, estas características facilitan su uso como materia prima para obtener combustibles líquidos (Davis *et al.*, 2017).

Figura 2

Hojas de Cabuya (Agave americana L.) recolectadas en el área de estudio



Otra característica a destacar del género *Agave* es su monocarpismo, debido a lo cual florecen una sola vez antes de la muerte (ver Figura 3). Su polinización se da por medio de las abejas, avispas, murciélagos, entre otros. Asimismo, la *Cabuya (Agave americana L.)* posee importantes propiedades medicinales y es fuente de materia prima para la elaboración de productos como: miel, medicinas, papel y tequila, cuya producción a gran escala genera gran cantidad de biomasa residual útil para la generación de biocombustible líquido u otro tipo de energía (Giraldo, 2017).

Figura 3

Inflorescencia del cultivo de Cabuya (Agave americana L.) recolectada en el área de estudio



El género *Agave* también posee la propiedad de bio absorbente de metales pesados como el cadmio (II) y el Plomo (II), registrando valores de 40 mg de plomo y 12.5 mg de cadmio por gramo de fibra a un pH de 2.6. Estas cualidades quelantes se podrían utilizar como fitorremediadora en aguas residuales contaminadas con metales pesados (Guevara y Vallejo, 2014). El néctar del *Agave* contiene aproximadamente 10% de azúcares, de los cuales el 90% está conformado por sacarosa y el resto por fructanos (oligosacáridos y polisacáridos) constituidos por unidades de fructosa (Cerdeira, 2011).

El cultivo de *Agave* en el Perú necesita asesoramiento técnico para mejorar el crecimiento de las especies entre 5 a 7 años, aplicando tecnologías de cultivo *in vitro*, que permitan incrementar su propagación en menor tiempo (Criollo, 2011) y el uso de microorganismos que promuevan el crecimiento de la planta (De La Torre *et al.*, 2016).

2.1. Partes de la Cabuya (*Agave americana* L.)

a. Raíz

La Cabuya (*Agave americana* L.) posee raíces primaria y secundaria, esta última llega hasta los 3 m de profundidad y le sirve como soporte, además tienen amplia utilidad en la producción de jabón y champú debido a su contenido de saponinas (Cervantes & Inga, 2015).

b. Cabeza

La cabeza o tallo es la parte central de planta, posee forma cilíndrica, concentra la mayor parte del néctar y desde aquí nacen las hojas (Cervantes & Inga, 2015). Su tallo es de tipo acaulescente (corto o ausente) y también se le conoce con el nombre de “corazón” o “piña” (Barrientos *et al.*, 2019).

c. Hojas

Las hojas concentran gran cantidad de azúcares que equivalen a más de la mitad de los que posee la cabeza (Montañez *et al.*, 2011).

d. Flor

La inflorescencia es de tipo espiga y sus flores poseen un color amarillo verdoso (Barrientos *et al.*, 2019).

e. Fruto

El fruto es de forma capsular, alargado y en su interior posee una gran cantidad de semillas (Barrientos *et al.*, 2019).

f. Semillas

Las semillas tienen forma alada y endospermo carnoso (Cervantes & Inga, 2015).

3. Análisis del Ciclo de Vida (ACV)

El ACV es un tipo de contabilidad ambiental, se caracteriza por ser de carácter iterativo, sus fases individuales utilizan resultados de las fases anteriores. El ACV representa una herramienta esencial para evaluar los aspectos e impactos ambientales potenciales relacionados a un producto o servicio, a fin de plantear alternativas de mejora y orientar la toma de decisiones. El ACV no considera los aspectos económicos y sociales relacionados a un producto o servicio (Rodríguez *et al.*, 2016). El ACV cuantifica los insumos, la energía utilizada en todo el proceso y los residuos liberados al ambiente (Sánchez *et al.*, 2012). El uso de esta metodología permite identificar los puntos críticos o llamados también “hots pots” ambientales de un sistema específico, a fin de poder plantear posibles estrategias de mitigación a cada uno de los procesos críticos identificados (Vázquez *et al.*, 2018).

Con relación a los impactos generados por un producto o servicio, es importante tener en cuenta que los contaminantes producidos a lo largo de su ciclo de vida poseen un mecanismo de transporte, que les permite trasladarse de un medio a otro (aire, suelo y agua), causando efectos perjudiciales en la biodiversidad (Falabella *et al.*, 2018).

Las Normas Técnicas Peruanas (NTP) utilizadas para el desarrollo de la presente investigación fueron:

- NTP-ISO 14040:2017 Gestión Ambiental -- Análisis del Ciclo de Vida -- Principios y Marco de Referencia.
- NTP-ISO 14044:2019 Gestión Ambiental – Análisis del Ciclo de Vida – Requisitos y Directrices.

3.1. Fases de un AVC

Las normas NTP-ISO 14040: 2017 y 14044:2019 consideran que todo ACV está conformado por cuatro fases que se encuentran debidamente interrelacionadas (ver Tabla 7).

Tabla 7

Fases de un Análisis de Ciclo de Vida

N° de Fase	Nombre	Descripción
Fase 1	Definición de objetivo, Unidad Funcional (UF) y alcance	Se define el objetivo del ACV de forma clara y concreta, la UF en base a la cual se realizarán la cuantificación de los impactos y el alcance del sistema para establecer los límites del análisis.
Fase 2	Análisis de Inventario	Se realiza una recopilación de los datos de entrada, intermedios y de salida de los procesos y operaciones unitarias incluidas en el ACV.
Fase 3	Evaluación de Impacto Ambiental	Se realiza el cálculo de los impactos generados, en base a los métodos y categorías seleccionadas, a fin de identificar los procesos que generan mayores efectos negativos al ambiente.
Fase 4	Interpretación de resultados	Representa la base para la definición de las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones.

Nota. Adaptado de "Gestión Ambiental- Análisis del Ciclo de Vida – Requisitos y Directrices" (NTP-ISO 14044:2019), por Instituto Nacional de Calidad (INACAL), 2019.

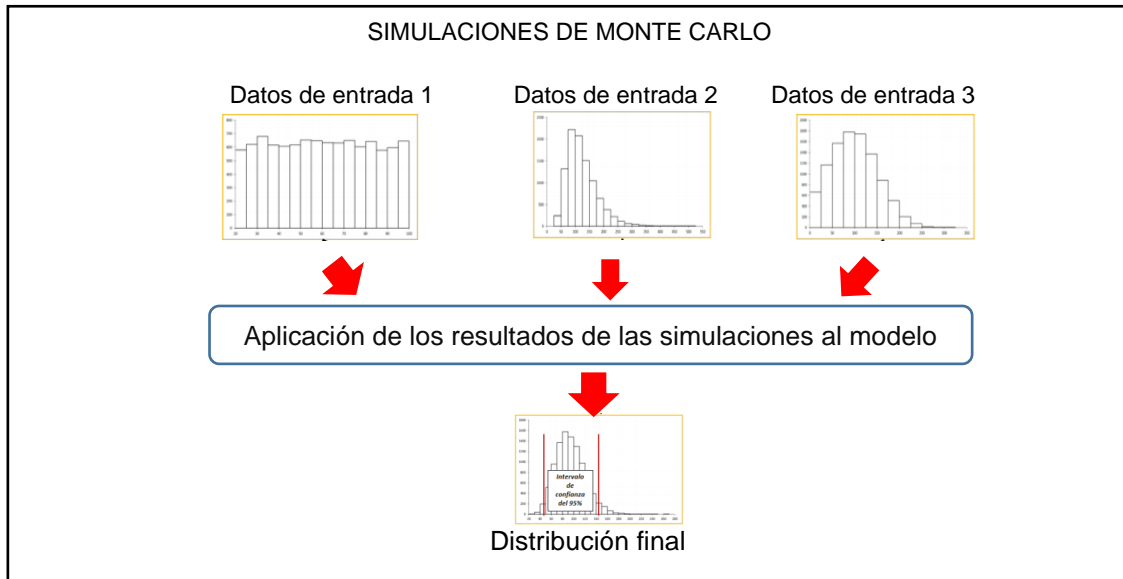
4. Análisis de Incertidumbre

4.1. Análisis de Monte Carlo

El análisis de Monte Carlo permite realizar el tratamiento estadístico de los datos de un ACV, mediante repetidas simulaciones, empleando algoritmos para generar valores aleatorios, que luego se utiliza en un modelo simple o complejo para obtener un rango de incertidumbre de los resultados del inventario (ver Figura 4) (Lozano, 2014; Corona, 2016). En ese sentido, contribuye a identificar la precisión de las estimaciones y el rango en el que se puede encontrar el valor real de los impactos (McMurray *et al.*, 2017).

Figura 4

Simulación de Montecarlo



Nota. Tomado de “Guía para aplicar el enfoque de Monte Carlo al análisis de incertidumbre en la contabilidad forestal y de Gases de Efecto Invernadero”, por McMurray *et al.*, 2017, Winrock International.

4.2. Análisis mediante matriz de Pedigree

El enfoque semicuantitativo aplicado para determinar la incertidumbre en la calidad de los datos sigue una distribución logarítmica normal y está basado en el uso de la matriz de Pedigree, la cual considera dos tipos de incertidumbre: la Incertidumbre básica (debido a la inexactitud de los datos o error estocástico) y la Incertidumbre adicional (debido al uso de datos imperfectos) (Müller *et al.*, 2014).

La matriz de Pedigree evalúa las fuentes de datos en base a cinco indicadores de calidad (confiabilidad, integridad, correlación temporal, correlación geográfica y correlación tecnológica adicional), a su vez cada indicador posee cinco valores de puntuación (ver Tabla 8 y Tabla 9). El análisis se realiza en base a las puntuaciones asignadas a cada indicador, con los cuales se crean grupos de datos y seguidamente se calcula la incertidumbre adicional. Se incluye también

en el cálculo, el factor de incertidumbre relacionado a la carga ambiental, el cual equivale a la incertidumbre básica, adicionalmente se toma como referencia la incertidumbre total obtenida para el grupo con puntuación ideal de cada indicador (Ciroth *et al.*, 2016; Vázquez *et al.*, 2017). Para realizar el cálculo matemático de cada proceso unitario se utiliza la Ecuación 4, mediante la cual se obtiene la varianza que luego se transforma en desviación estándar geométrica.

Ecuación (4):

$$U_T = \sigma^2 = \exp \sqrt{\underbrace{(\ln U_1)^2 + (\ln U_2)^2 + (\ln U_3)^2 + (\ln U_4)^2 + (\ln U_5)^2}_{U_a} + (\ln U_b)^2}$$

Nota. Tomado de “Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent”, por Ciroth *et al.*, 2016, *International Journal of Life Cycle Assessment*.

Donde:

U_T = Incertidumbre total

U_1 = Factor de incertidumbre de confiabilidad

U_2 = Factor de incertidumbre de integridad

U_3 = Factor de incertidumbre de correlación temporal

U_4 = Factor de incertidumbre de correlación geográfica

U_5 = Factor de incertidumbre de correlación tecnológica adicional

U_a = Factor de Incertidumbre adicional

U_b = Factor de incertidumbre básica

Tabla 8
Matriz Pedigree

Indicador de puntuación	1	2	3	4	5 (por defecto)
Fiabilidad	Datos verificados sobre la base de las mediciones.	Datos verificados en parte basadas en supuestos o datos no verificados basados en mediciones.	Datos no verificados basados en parte en estimaciones limitadas.	Estimación cualificada (por ejemplo, por experto de la industria).	Estimaciones no cualificadas.
Integridad	Datos representativos de todos los sitios relevantes para el mercado considerado, durante un período suficiente para contrarrestar las fluctuaciones normales.	Datos representativos de más del 50% de los sitios relevantes para el mercado considerado, durante un período suficiente para contrarrestar las fluctuaciones normales.	Datos representativos de sólo algunos sitios (< 50% de sitios pero de menor período.	Datos representativos de un solo sitio relevantes para el mercado considerado, o en algunos sitios, pero a partir de períodos más cortos.	Representatividad de datos desconocidos de un pequeño número de sitios y de períodos más cortos.
Correlación temporal	Menos de 3 años de diferencia en el período de tiempo del conjunto de datos.	Menos de 6 años de diferencia en el período de tiempo del conjunto de datos.	Menos de 10 años de diferencia en el período de tiempo del conjunto de datos.	Menos de 15 años de diferencia en el período de tiempo del conjunto de datos.	Antigüedad de los datos desconocidos o más de 15 años de diferencia en el período de tiempo del conjunto de datos.
Correlación geográfica	Datos del área de estudio.	Datos promedio en una gran área en la que se incluye el área de estudio.	Los datos del área con las condiciones de producción similares.	Los datos del área con pocas condiciones de producción similares.	Los datos de una zona desconocida o claramente diferente (América del Norte en lugar de Oriente Medio, la OCDE y de Europa en lugar de Rusia).
Correlación de nuevos avances tecnológicos	Datos de empresas, procesos y materiales del estudio.	Datos de procesos y materiales del estudio (es decir, idéntica tecnología), pero de empresas diferentes.	Datos de procesos y materiales del estudio, pero de diferente tecnología.	Datos de procesos o materiales relacionados.	Datos sobre procesos relacionados a escala de laboratorio o de una tecnología diferente.

Nota. Adaptado de "Análisis del ciclo de vida como instrumento de desarrollo de la ecología industrial: aplicación al proceso de impresión de un periódico", por Lozano, 2014.

Tabla 9
Factores de incertidumbre aplicados a la matriz de Pedigree

Indicador de puntuación	1	2	3	4	5 (por defecto)
Fiabilidad	1	1.05	1.10	1.20	1.50
Integridad	1	1.02	1.05	1.10	1.20
Correlación temporal	1	1.03	1.10	1.20	1.50
Correlación geográfica	1	1.01	1.02	ND	1.10
Correlación de nuevos avances tecnológicos	1	ND	1.20	1.50	2.00

Nota. ND: No definido. Adaptado de "Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in Ecoinvent", por Ciroth et al., 2016, International Journal of Life Cycle Assessment.

III. OBJETIVOS E HIPOTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1. Objetivo general

Determinar y analizar los potenciales impactos ambientales negativos generados en el ACV del biocombustible 2,5 Dimetilfurano, obtenido a partir de hojas de Cabuya (*Agave americana* L.).

2. Objetivos específicos

- Analizar el efecto de la Cabuya (*Agave americana* L.) y sus hojas sobre la calidad del suelo.
- Comparar los impactos ambientales generados bajo el sistema desarrollado y los impactos ambientales obtenidos bajo los escenarios propuestos.
- Identificar el escenario más sostenible ambientalmente y el escenario de menor sostenibilidad ambiental entre todos los escenarios evaluados.

3. Hipótesis general

Durante el ciclo de vida del biocombustible 2,5 Dimetilfurano, obtenido a partir de hojas de Cabuya (*Agave americana* L.), se generan impactos negativos al aire, agua y energía.

IV. METODOLOGÍA

La presente investigación empleó la metodología del Análisis del Ciclo de Vida descrita en las NTP-ISO 14040:2017 y NTP-ISO 14044:2019.

1. Tipo de Investigación

La presente Investigación corresponde al tipo experimental, dado que los datos de entrada y salida fueron obtenidos mediante procedimientos experimentales a escala de laboratorio, lo cual permitió evaluar los cambios en la variable independiente “Ciclo de vida del biocombustible 2,5-DMF”, a fin de determinar la variación de los efectos en la variable dependiente “Potenciales Impactos Ambientales negativos”.

2. Población

La población seleccionada estuvo representada por las plantas de Cabuya (*Agave americana* L.) existentes en la zona de estudio.

3. Muestra y muestreo

La muestra estuvo conformada por 5 hojas de plantas adultas de Cabuya (*Agave americana* L.), de 6 a 7 años aproximadamente, las plantas jóvenes y maduras fueron descartadas del estudio. Para la selección de las hojas de plantas adultas se aplicó un muestreo de tipo aleatorio simple.

4. Técnica de Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento de la información se realizó mediante el modelamiento de los procesos y operaciones unitarias en el software de cálculo SimaPRO versión 9.0 de origen holandés. Se empleó como entradas y salidas los datos obtenidos de forma experimental y los datos extraídos de la literatura científica, además se utilizó la base de datos Ecoinvent de origen suizo (principal base de datos de un ACV), a fin de realizar la cuantificación de los impactos ambientales por cada método y categoría seleccionada en el software SimaPRO.

El análisis de datos estuvo conformado por un análisis de incertidumbre mediante la simulación de Monte Carlo empleando el software SimaPro. Para fortalecer la solidez de la investigación se incluyó el análisis de incertidumbre de la calidad de datos (Incertidumbre básica + Incertidumbre adicional) mediante la matriz de Pedigree.

4.1. Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad aplicado al presente estudio buscó evaluar la variabilidad de los impactos ambientales del 2,5 DMF, debido a la sustitución de los procesos críticos y parámetros sensibles identificados en el ACV. Para llevar a cabo el análisis de sensibilidad se empleó el software SimaPRO y se plantearon tres escenarios propuestos (2 positivos y 1 negativo), en los cuales se consideraron condiciones específicas de acuerdo a los procesos críticos identificados en el ACV (ver Tabla 10). Analizado los impactos bajo cada escenario se determinó el escenario con mayor y menor sostenibilidad ambiental para la producción del biocombustible 2,5 DMF.

Tabla 10

Escenarios propuestos para la evaluación de impactos ambientales

Escenario propuesto (EP)	Evaluación del Impacto	Consideraciones
EP N° 1:	Al aire	Escenario positivo que considera el transporte de la materia prima secundaria en un solo tramo con vehículo de carga ligero; asimismo, la sustitución de la hidrólisis enzimática por una hidrólisis térmica, con lo cual se evitaría la importación de la enzima del extranjero; además, se incluye la adquisición de insumos en un mercado local.
EP N° 2:	Por degradación del agua	Escenario negativo que considera un sistema sin recirculación de materiales (productos evitados).
EP N° 3:	Por consumo de energía	Escenario positivo que considera el uso de energía obtenida por cogeneración, empleando bagazo de Cabuya, a fin de abastecer la demanda total de energía del sistema.

5. Procedimiento para la obtención del biocombustible 2,5 DMF

5.1. Etapa de extracción y recolección de biomasa residual

Esta etapa se llevó a cabo en el distrito de Huanca-Huanca, provincia de Angaraes, región Huancavelica, consideró un análisis del área de estudio y un análisis de calidad de suelo de las zonas seleccionadas.

La extracción y recolección de la biomasa residual inicio con el retiro de las hojas de Cabuya (*Agave americana* L.) utilizando guantes protectores y una herramienta de corte. La biomasa recolectada fue cubierta con papel periódico para luego ser colocada de forma vertical dentro de bolsas plásticas y finalmente fue almacenada para su traslado a la ciudad de Lima.

a. Análisis del área de estudio

El distrito de Huanca-Huanca se encuentra ubicado aproximadamente a 3700 m.s.n.m., siendo la agricultura y ganadería las principales actividades

económicas. Debido a su ubicación geográfica esta zona es de difícil acceso y las condiciones de vida de sus pobladores se encuentran en un alto nivel de pobreza, además no cuentan con acceso a los servicios básicos para una vida saludable.

El área de estudio estuvo conformada por dos zonas, la primera donde existían cultivos de Cabuya (*Agave americana* L.) se le denominó Zona 1 “Cultivos de Cabuya” y a la segunda donde existían diversos cultivos, se le denominó: Zona 2 “Cultivos locales” (ver Figura 5). Cabe mencionar, que la extracción y recolección de las muestras vegetales fue con la ayuda y autorización del señor Rafael Alvarado Morocho, agricultor local y dueño de la parcela de cultivo.

Figura 5

Ubicación del área de estudio



Nota. Tomado de Google-earth.

Los ejemplares de Cabuya (*Agave americana* L.) encontrados en la zona seleccionada eran utilizados en su mayoría como cerco vivo alrededor de los terrenos agrícolas y en zonas de laderas para evitar la erosión de los suelos.

De acuerdo con la información recibida de los agricultores locales, el suelo donde se encontraban los “Cultivos de Cabuya” no recibe tratamiento para su fertilización ni riego periódico, razón por la cual el desarrollo de los cultivos es dependiente directamente de las condiciones ambientales del lugar. Por su parte, el suelo de la zona de “Cultivos Locales” era tratado con residuos agrícolas y excretas de ovinos, además utilizaban riego por goteo y aspersion mediante el uso de mangueras. Entre los principales cultivos principales destacan: papa, cebada, maíz, arveja y trigo, los cuales son utilizados para consumo familiar y para comercio con los pueblos aledaños.

b. Análisis de Calidad de suelos

El análisis completo de calidad de suelos fue realizado en el laboratorio de Certificaciones del Perú (CERPER) S.A. mediante el método de ensayo EPA 200.7.1994, con el objetivo de comparar la calidad de suelo de las zonas seleccionadas La recolección de muestras se realizó en cuatro puntos de muestreo en cada zona (ver Tabla 11).

Tabla 11

Ubicación de los puntos de muestreo

Puntos de muestreo	Zona 1: “Cultivos de Cabuya”				Zona 2: “Cultivos Locales”			
	Coordenadas geográficas		Coordenadas UTM WGS84-ZONA 18 S		Coordenadas geográficas		Coordenadas UTM WGS84-ZONA 18 S	
	Latitud	Longitud	Norte	Este	Latitud	Longitud	Norte	Este
P1	12°51'42.24”	74°37'34.45”	8578125	540554	12°51'41.69”	74°37'33.46”	8578142	540584
P2	12°51'42.70”	74°37'34.62”	8578111	540549	12°51'41.82”	74°37'33.32”	8578138	540588
P3	12°51'42.73”	74°37'34.28”	8578110	540559	12°51'21.56”	74°37'33.19”	8578146	540592
P4	12°51'42.21”	74°37'33.92”	8578126	540570	12°51'41.43”	74°37'33.42”	8578150	540585

Los rangos de valores aceptados para cada parámetro en el análisis de suelos fueron proporcionados por el laboratorio CERPER y se emplearon como referencia para comparar los resultados obtenidos en cada zona (Ver Anexo 7).

5.2. Etapa de transporte

La etapa de transporte de la biomasa residual consideró un viaje de ida y uno de retorno. Para el caso del transporte de insumos importados se consideró solo el envío desde el lugar de origen del producto.

a. Transporte de biomasa residual

El viaje de ida se realizó el viernes 30 de agosto del año 2019, inició en bus desde la ciudad de Lima rumbo a la ciudad de Huancavelica con un tiempo de viaje de 10 horas, se continuó el viaje en automóvil durante un tiempo de 3 horas hasta el distrito Huanca-Huanca, en donde se realizó la recolección de la biomasa residual. Para el retorno a la ciudad de Lima se utilizó la misma ruta y tipos de vehículos (ver Tabla 12).

Tabla 12

Vehículos y combustibles empleados en el transporte de la biomasa residual

Tramo	Tipo de vehículo	Cantidad de pasajeros	Combustible utilizado	Distancia recorrida (km)	Trayecto recorrido
1	Vehículo pesado tipo bus (transporte de carga/pasajeros)	70	Diésel DB5	846 (ida y vuelta)	Trayecto ida desde Agencia Buses Lima hasta Agencia Buses Huancavelica y retorno mismo punto.
2	Vehículo ligero tipo automóvil (transporte de pasajeros)	3	Gasohol 90 octanos	218 (ida y vuelta)	Trayecto ida desde Agencia buses Huancavelica hasta zona de cultivo distrito Huanca-Huanca y retorno mismo punto.
3	Vehículo ligero tipo automóvil (transporte de pasajeros)	1	Gasohol 90 octanos	13.7 (solo ida)	Trayecto se consideró solo ida desde Agencia buses Lima hasta UNALM, distrito La Molina.

Los combustibles comercializados en el Perú, como el gasohol de 90 octanos y Diésel B5, contienen 7.8% de bioetanol y 5% de biodiésel respectivamente. En ese sentido, para determinar el FE resultante de los combustibles empleados en la investigación, se disminuyó el valor equivalente al porcentaje del contenido del biocombustible en el FE por defecto del combustible fósil (ver Tabla 13).

Tabla 13

Factor de emisión resultante de los combustibles empleados

GEI	COMBUSTIBLE 1			COMBUSTIBLE 2		
	FE _{GEI-gasolina}	FE _{GEI-bioetanol}	FE _{GEI-gasohol}	FE _{GEI-Diésel}	FE _{GEI-biodiésel}	FE _{GEI-diéselB5}
	(kg GEI/TJ)	(kg GEI/TJ)	(kg GEI/TJ)	(kg GEI/TJ)	(kg GEI/TJ)	(kg GEI/TJ)
CO ₂	69 300.00	5 406.00	63 894.00	74 100.00	3 705.00	70 395.00
CH ₄	3.80	0.30	3.50	3.90	0.20	3.70
N ₂ O	5.70	0.45	5.26	3.90	0.20	3.70

Nota. GEI: Gas de Efecto Invernadero, FE: Factor de Emisión.

Las emisiones debido al transporte de la biomasa residual fueron calculadas empleando la Ecuación de Nivel 1 y los FE por defecto para la combustión móvil de las Directrices del IPCC (ver Tabla 14). Cabe indicar, que se utilizó el Nivel 1 de cálculo y los valores por defecto, debido a que no se encuentran disponibles los contenidos del carbono específicos del país.

Tabla 14

Emisiones de GEI por tramo recorrido en el transporte de biomasa residual

Trayectos recorridos	GEI	Consumo de combustible (TJ)	FE _{GEI-comb./N° pasajeros} (kg-GEI /TJ)	Total emisiones (kg GEI)
Tramo 1 (Diésel B5)	CO ₂	8.12 x 10 ⁻³	1 005.64	8.17
	CH ₄	8.12 x 10 ⁻³	0.05	0.42 x 10 ⁻³
	N ₂ O	8.12 x 10 ⁻³	0.05	0.42 x 10 ⁻³
Tramo 1 (Gasohol 90)	CO ₂	0.61 x 10 ⁻³	21 298.20	13.00
	CH ₄	0.61 x 10 ⁻³	1.17	0.71 x 10 ⁻³
	N ₂ O	0.61 x 10 ⁻³	1.75	1.07 x 10 ⁻³

	CO ₂	0.04 x 10 ⁻³	63 894.60	2.45
Tramo 1	CH ₄	0.04 x 10 ⁻³	3.50	0.13 x 10 ⁻³
(Gasohol 90)	N ₂ O	0.04 x 10 ⁻³	5.26	0.20 x 10 ⁻³

Nota. GEI: Gas de Efecto Invernadero, FE: Factor de Emisión

b. Transporte de insumos importados

Se consideró solo el transporte de insumos importados, debido a que no se producen en el país (ver Tabla 15). Para el resto de insumos utilizados se consideró un transporte por defecto incluido en los datos de inventario del software de cálculo SimaPRO.

Tabla 15

Transporte de insumos importados

Insumo importado	Compañía	Tipo de transporte	Lugar de origen	Lugar de destino	Distancia recorrida (km)
Enzima Inulinasa	Sigma-Aldrich	Transporte aéreo (tramo 1)	Aeropuerto Internacional de Lambert (Estados Unidos)	Aeropuerto Internacional Jorge Chavez (Perú)	5 810.85
		Transporte Terrestre (tramo 2)	Aeropuerto Internacional Jorge Chavez (Perú)	Universidad Nacional Agraria la Molina	24.20
Catalizador CuRu/C	Strem Chemicals, INC	Transporte aéreo (tramo 1)	Aeropuerto Internacional Logan (Estados Unidos)	Aeropuerto Internacional Jorge Chavez (Perú)	6079.67
		Transporte Terrestre (tramo 2)	Aeropuerto Internacional Jorge Chavez (Perú)	Universidad Nacional Agraria la Molina	24.20

Para determinar el combustible consumido en el transporte aéreo, se empleó la base de cálculo en Excel de la AEMA para aviación, correspondiente al año 2019 (ver Tabla 16). Asimismo, se consideró como combustible tipo Turbo jet A1 y un modelo de avión Airbus 330 para transporte de carga.

Tabla 16

Consumo de combustible estimado según hoja de cálculo AEMA

Insumo transportado	Total millas náuticas (nmi) recorridas	Total combustible quemado (kg)
Enzima Inulinasa de Asperligus Níger	3137.61	38 506.30
metal CuRu/C	3282.76	40 101.73

Las emisiones de GEI producidas por el transporte de insumos importados fueron calculadas utilizando la Ecuación de Nivel 1 para aviación y los FE por defecto para el transporte aéreo de las Directrices del IPCC (ver Tabla 17).

Tabla 17

Emisiones de GEI por tipo de transporte para los insumos importados

Insumo importado	Tipo de transporte	GEI	Consumo de combustible (TJ)	FE _{GEI-comb} (kg-GEI /TJ)	Total emisiones (kg GEI)
Enzima Inulinasa	Aéreo (Turbo Jet A1)	CO ₂	1.66	71 500.00	118 387.62
		CH ₄	1.66	0.50	0.83
		N ₂ O	1.66	2.00	3.31
	Terrestre (Gasohol 90)	CO ₂	0.09 x 10 ⁻³	63 894.60	5.73
		CH ₄	0.09 x 10 ⁻³	3.50	0.31 x 10 ⁻³
		N ₂ O	0.09 x 10 ⁻³	5.26	0.47 x 10 ⁻³
Catalizador CuRu/C	Aéreo (Turbo Jet A1)	CO ₂	1.72	71 500.00	123 292.77
		CH ₄	1.72	0.50	0.86
		N ₂ O	1.72	2.00	3.45
	Terrestre (Gasohol 90)	CO ₂	0.09 x 10 ⁻³	63 894.60	5.73
		CH ₄	0.09 x 10 ⁻³	3.50	0.31 x 10 ⁻³
		N ₂ O	0.09 x 10 ⁻³	5.26	0.47 x 10 ⁻³

Nota. GEI: Gas de Efecto Invernadero, FE: Factor de Emisión.

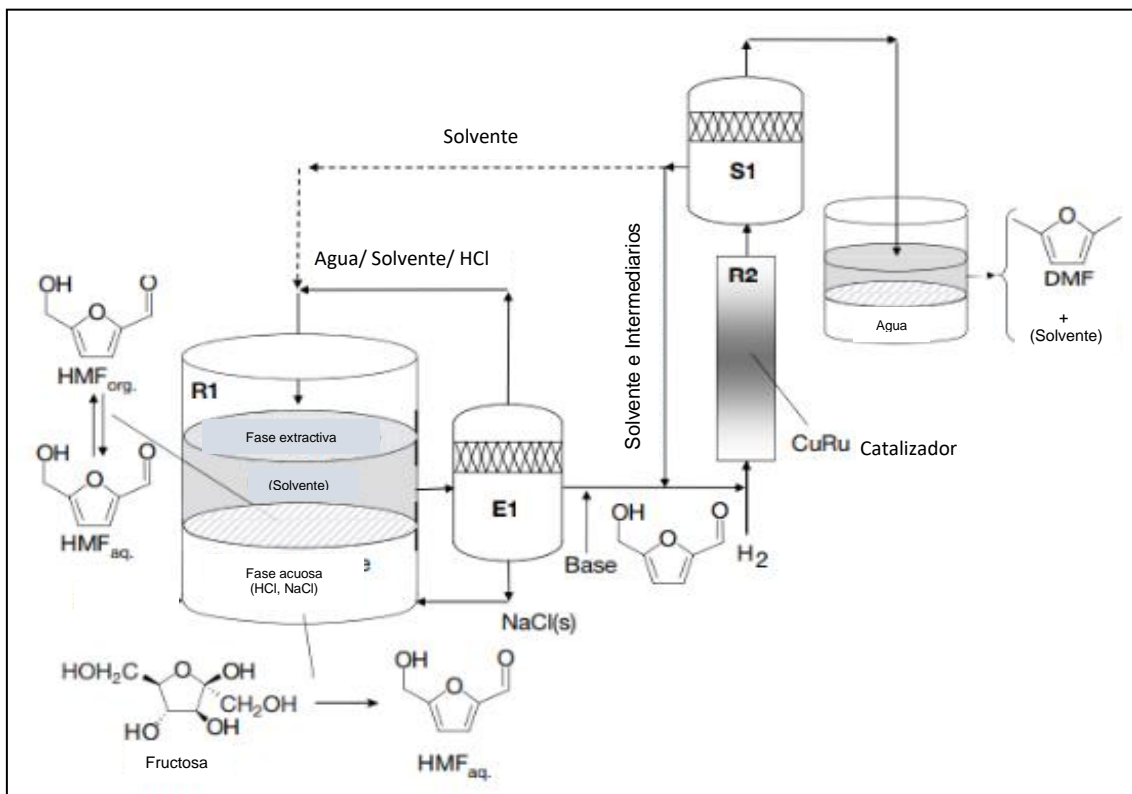
5.3. Etapa de transformación o conversión de biomasa

Se llevó a cabo en el laboratorio de Química (Q-1) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Agraria La Molina, ubicada en el distrito de La Molina, departamento de Lima. Para realizar la conversión de la fructosa se aplicó el

método desarrollado por Leshkov *et al.*, (2007) (ver Figura 6). Asimismo, para complementar el citado método se realizó el pre-tratamiento de la biomasa, el prensado y la reacción de hidrólisis de fructanos.

Figura 6

Diagrama esquemático del proceso de conversión de fructosa a 2,5 DMF



Nota. Tomado de "Production of Dimethylfuran for liquid fuels from biomass-derived carbohydrates", por Leshkov *et al.*, 2007, *Nature*.

a. Pre-tratamiento de la biomasa residual

Para realizar la extracción de los fructanos, se aplicó el procedimiento reportado por Montañez *et al.* (2011), el cual consistió en someter las hojas de Cabuya (*Agave americana* L.) a un pretratamiento que incluyó el lavado de hojas, cortado y cocción.

Después de realizar el lavado de hojas con agua de grifo, se retiraron las espinas empleando una tijera podadora, para luego separar las bases de las puntas

(parte media superior) utilizando un cuchillo, debido a que las bases presentan mayor contenido de néctar. Posteriormente, las bases fueron cortadas en trozos pequeños para su cocción a una temperatura de 200°C. El consumo eléctrico del horno empleado se determinó considerando una potencia de 0.80 kW y un tiempo de cocción de 30 min.

Las partes de las hojas no utilizadas (puntas, espinas y restos secos) fueron dispuestos como residuos de esta etapa. Sin embargo, estas partes son empleadas por los pobladores locales para la elaboración de hilos, cuerdas, agujas y compost para los cultivos.

b. Prensado de los trozos de cabuya

Se empleó un extractor de jugos casero para realizar el prensado de los trozos de Cabuya (*Agave americana* L.), a fin de obtener el extracto puro (aguamiel). Para determinar el consumo eléctrico del extractor casero, se consideró una potencia eléctrica de 0.30 kW y un tiempo de uso de 2 h de uso aproximadamente.

El principal sub-producto obtenido de esta operación es el bagazo de Cabuya (*Agave americana* L.), el cual representa un recurso de especial importancia por poseer múltiples aplicaciones en la industria como la producción de papel, compost, energía, productos artesanales, bio absorbente (natural) y carbón activado.

c. Filtrado y Dilución del extracto de cabuya

El extracto puro fue filtrado utilizando una bomba de vacío, seguidamente el extracto filtrado se diluyó con agua ultra pura hasta obtener una muestra con 5%

en peso de extracto. Cabe mencionar, que la potencia eléctrica de la bomba de vacío utilizada fue de 0.10 kW y el tiempo de uso fue de 1 h.

Análisis de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS)

El análisis de ICP-MS fue realizado en el laboratorio CERPER S.A. mediante el método de ensayo EPA 200.7.1994, para lo cual se envió una muestra en estado líquido de 500 mL de extracto de Cabuya (*Agave americana* L.). El análisis de ICP-MS tiene especial importancia para el proceso de conversión, porque determina la cantidad y tipos de metales presentes en la muestra de extracto puro. Dado que la presencia de metales en el extracto podría actuar como un tipo de inhibidor irreversible afectando la actividad enzimática durante la hidrólisis.

Análisis de Cromatografía Líquida (HPLC) determinación de Azúcares Individuales y totales

El análisis de HPLC para azúcares fue realizado en el laboratorio CERPER S.A. mediante el método de ensayo AACC 80-0401.11 thEd 2009, para lo cual se envió una muestra de 250 mL de extracto de Cabuya (*Agave americana* L.). El análisis de HPLC fue necesario para determinar la cantidad y tipos de azúcares individuales (monosacáridos) presentes en el extracto puro previo al proceso de hidrólisis enzimática.

d. Hidrólisis enzimática de los fructanos

La muestra diluida fue sometida a hidrólisis enzimática, empleando la enzima Inulinasa liofilizada de *Aspergillus Níger* (Merck) β -D-2,1- fructano

fructohidrolasa, la cual fue activada en una disolución amortiguadora a pH 5.5 en relación de (1:4).

Posteriormente, las disoluciones fueron dispuestas en tubos eppendorf de 5 mL de capacidad y llevadas al horno eléctrico a 55°C. El consumo eléctrico del horno se determinó empleando una potencia eléctrica de 0.80 kW y un tiempo de reacción por muestra de 120 min.

Análisis de Cromatografía Líquida (HPLC) de alto rendimiento para la determinación de fructosa

El análisis de HPLC para fructosa fue realizado en el laboratorio Labicer ubicado en la Universidad Nacional de Ingeniería mediante el método AOAC 977.20 “Separation of Sugars in Honey”, a fin de determinar el contenido de fructosa en la muestra de extracto hidrolizado de Cabuya (*Agave americana* L.).

e. Deshidratación ácida de la fructosa

Los insumos y materiales empleados fueron: un catalizador ácido (HCl) a 0.25 M, un solvente de bajo punto de ebullición (1-butanol) y una sal (NaCl) al 35% p/V para mejorar la eficiencia en la extracción del 5-Hidroximetilfurfural (HMF). Se utilizó una bomba calorimétrica que cumplía la función de reactor de mesa casero, en su interior se colocó disoluciones de HCl, 1-butanol y NaCl, además se consideró una relación volumétrica de las fases orgánica y acuosa (V_{org}/V_{aq}) de 3:2.

Se utilizó un equipo agitador magnético con calentamiento, para someter la reacción a un baño de glicerina a 453 K y agitación constante durante 4 min, luego de este tiempo se dejó enfriar el reactor. Para el cálculo del consumo

eléctrico del agitador magnético, se consideró una potencia eléctrica de 1.52 kW y un tiempo de reacción de 1.47 h.

f. Extracción y purificación de la fase orgánica

El procedimiento para la extracción y purificación se inició con la separación de las fases orgánica y acuosa 1 empleando un embudo de decantación, luego se neutralizó el contenido de ácido en la muestra de fase orgánica utilizando una disolución de NaHCO_3 . Se agregó un agente químico deshidratante Na_2SO_3 para extraer el contenido de agua presente en la muestra y se agitó por 5 min. En el embudo de decantación fue retirada la capa de agua formada en el fondo del recipiente (fase acuosa 2).

La fase orgánica libre de agua se filtró empleando un embudo de vidrio y papel filtro a fin de retener las partículas de sal, obteniendo la fase orgánica purificada con el reactivo de interés (5-HMF). Tanto la fase acuosa 1 como las partículas de sal retenidas en el filtrado fueron recirculadas al proceso de deshidratación, a fin de reducir la cantidad de materiales empleados y residuos generados.

Análisis por cromatografía de gases para la determinación de 5-HMF

El análisis de cromatografía de gases con Detector de Ionización de Llama (FID) fue realizado en el laboratorio N° 21 de Investigación y Química Aplicada de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Ingeniería aplicando el método de ensayo EPA 8015B, mediante inyección directa con una columna capilar, se determinó el contenido de 5-HMF en la muestra deshidratada.

g. Hidrogenólisis

Los elementos de entrada para la reacción de hidrogenólisis fueron modelados a partir de los datos obtenidos en el proceso anterior y mediante el empleo de fuentes secundarias de artículos científicos (ver Tabla 18). Tales como la investigación a escala de laboratorio para la obtención de 2,5 Dimetilfurano, realizada por Leshkov *et al.* (2007) y al Análisis Tecno-económico para la producción de Dimetilfurano e Hidroximetilfurfural a partir de fructosa pura en procesos catalíticos, elaborada por Kazi *et al.* (2011).

En ese sentido, el procedimiento se inicia con la carga de la fase orgánica purificada (5-HMF+ solvente transportador), catalizador CuRu/C en el reactor discontinuo o batch. Previamente es necesario purgar el aire al interior del reactor con H₂ para luego sellarlo. Las condiciones de reacción fueron: presión de 6.8 bar de H₂ durante 10 h, temperatura de 493 K con una agitación de 400 RPM, se consideró también un consumo eléctrico del calentador de 45 kW-h.

Con relación a los flujos de salida, se obtienen dos fases: la fase acuosa (agua + subproductos) y la fase orgánica (solvente + DMF), siendo necesaria su separación, para luego proceder a recircular la fase acuosa al proceso anterior. La fase orgánica se lleva a una destilación fraccionada para obtener el biocombustible generado y el solvente transportador es recirculado al proceso de deshidratación acida.

Tabla 18

Cantidad de compuestos requeridos para reacción de hidrogenólisis

Magnitudes medidas	5-HMF (C₆H₆O₃)	H₂	2,5 DMF (C₆H₈O)	H₂O
Nº de moles iniciales	1.00	3.00	1.00	2.00
Nº de moles finales	9.26	27.78	9.26	18.52
Masa molecular (g/mol)	126.10	2.02	96.13	--
Masa (kg) requerida	1.17	0.06	0.89	--
Densidad (g/L)	1290.00	--	890.00	--
Volumen (L) requerido	0.91	--	1.00	--

Rendimiento energético del 2,5 DMF

El rendimiento energético del 2,5 DMF se determinó mediante la relación entre la energía desprendida por el biocombustible durante la combustión y la energía empleada durante su proceso de generación. Para realizar el cálculo se consideró el valor calorífico del biocombustible y un escenario de producción local (adquisición de insumos en mercado local, uso de energía obtenida por cogeneración del bagazo de cabuya), siendo factible conocer si la contribución energética del 2,5 DMF es útil o beneficiosa en relación con la energía consumida en su producción.

5.4. Etapa de uso (combustión)

El proceso de combustión completa fue evaluado mediante el software SimaPRO y se realizó una comparación entre las emisiones totales en kg CO₂-eq de 2,5 DMF, gasolina sin plomo y etanol anhidro, con el fin de conocer el combustible de mayor impacto sobre el calentamiento global. Para realizar el cálculo fue necesario recolectar datos de las emisiones específicas que se generan durante la quema de cada combustible seleccionado.

Los datos de consumo de combustible, gases de combustión y valores caloríficos fueron obtenidos de la literatura científica consultada, dichos valores fueron

ingresados al software de cálculo SimaPRO, a fin de realizar la evaluación por el método IPCC-2013 en la categoría de impacto Cambio Climático.

Para conocer la cantidad de combustible empleado y las emisiones generadas, se consideró el consumo específico gravimétrico necesario para producir 1 kW en 1 h (ver Tabla 19). El cálculo se realizó para carga baja con Presión Efectiva Media (IMEP) de 3.5 bar y carga alta con IMEP de 7.5 bar.

Tabla 19

Consumo específico gravimétrico de combustibles evaluados

Ítem	Combustibles	Densidad	Unidad	3.5 bar IMEP	8.5 bar IMEP
1	Biocombustible 2,5 DMF (DMF)	890 g/L	g	325	297
2	Gasolina sin plomo (ULG)	680 g/L	g	250	235
3	Biocombustible Etanol (ETH)	798 g/L	g	398	352

Nota. Adaptado de “Effect of spark timing load on a DISI engine fueled with 2,5-dimethylfuran”, por Ritchie *et al.*, 2011, *Fuel*.

Para determinar las emisiones totales generadas por cada tipo de combustible se utilizaron las emisiones específicas de NO_x, THC, CO, y CO₂ para cada IMEP y tipo de carga del motor seleccionada (ver Tabla 20). Asimismo, para el cálculo de las emisiones de GEI específicas generadas por la combustión de 1 L de cada combustible se utilizó el valor de la densidad de cada uno de ellos (ver Tabla 21).

Tabla 20
Emisiones específicas de NO_x, THC, CO y CO₂

Ítem	Principales GEI	Unidad	2,5 DMF		Gasolina sin plomo (ULG)		Etanol (ETH)	
			3.5 bar	8.5 bar	3.5 bar	8.5 bar	3.5 bar	8.5 bar
1	Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	g	6.85	11.20	6.75	9.00	5.5	9.10
2	Hidrocarburos Totales (THC)	g	6.80	4.80	7.50	5.20	2.60	1.85
3	Monóxido de Carbono (CO)	g	35.60	28.30	33.50	30.50	35.20	28.20
4	Dióxido de Carbono (CO ₂)	g	900.00	825.00	840.00	792.00	870.00	780.00

Nota. Adaptado de "Effect of spark timing load on a DISI engine fueled with 2,5-dimethylfuran", por Ritchie et al., 2011, *Fuel*.

Tabla 21
Emisiones de GEI específicas durante la combustión

Ítem	Emisiones	Unidad	2,5 DMF		Gasolina sin plomo (ULG)		Etanol (ETH)	
			3.5 bar IMEP	8.5 bar IMEP	3.5 bar IMEP	8.5 bar IMEP	3.5 bar IMEP	8.5 bar IMEP
1	Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	g	18.76	30.67	18.36	24.48	10.90	18.04
2	Hidrocarburos Totales (THC)	g	18.62	13.15	20.40	14.14	5.15	3.67
3	Monóxido de Carbono (CO)	g	97.49	77.50	91.12	82.96	69.78	55.90
4	Dióxido de Carbono (CO ₂)	kg	2.47	2.26	2.28	2.37	1.73	1.55

El procedimiento para la generación del 2,5 DMF se puede observar en el diagrama esquemático que resume de forma gráfica su ruta de obtención (ver Figura 7). Asimismo, se presenta un diagrama de flujo, en donde se aprecian los flujos de entrada, salida e intermedios, pertenecientes a todos los procesos y operaciones unitarias consideradas en el ACV (ver Figura 8).

Figura 7

Diagrama esquemático de la ruta de producción del biocombustible 2,5 Dimetilfurano desarrollado en la presente investigación

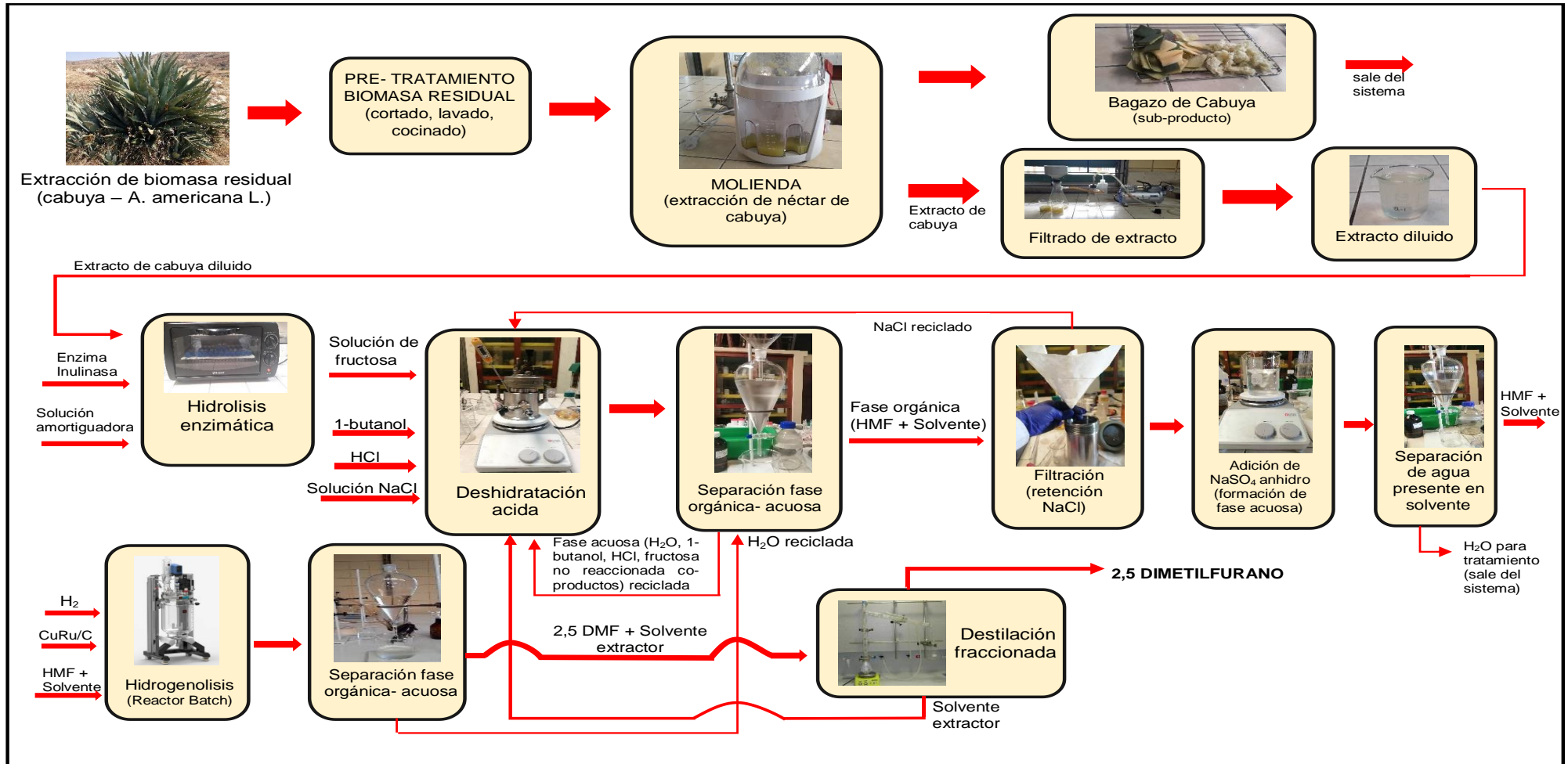
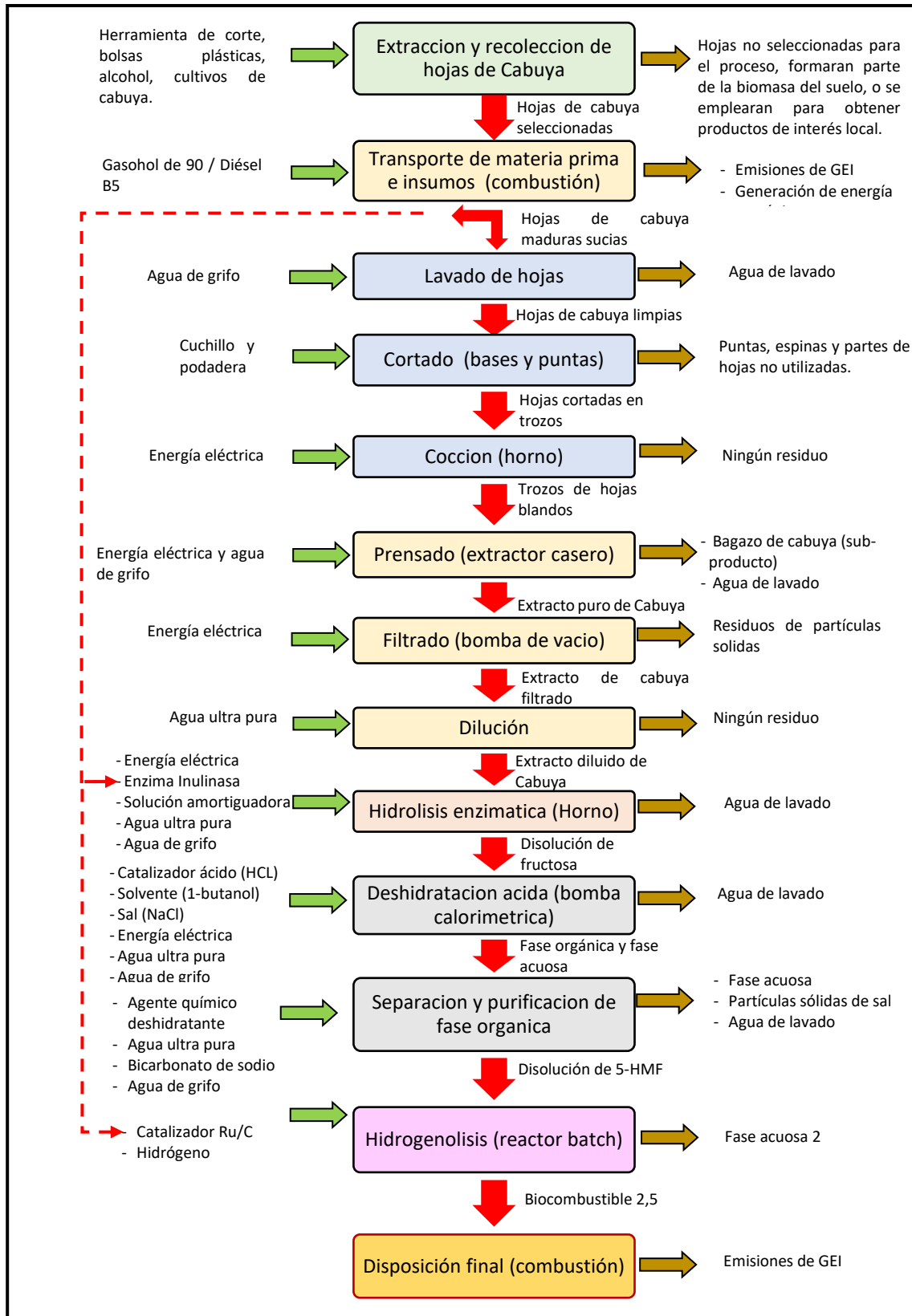


Figura 8

Diagrama de Flujo de los procesos y operaciones unitarios considerados en el ciclo de vida del biocombustible 2,5 DMF



6. Selección de métodos y categorías de impacto

El modelamiento de los procesos y operaciones unitarias se realizó en el software de cálculo SimaPRO, para lo cual se seleccionaron los métodos y categorías de impacto ambiental a evaluar (ver Tabla 22). Asimismo, se ingresaron los datos obtenidos en el desarrollo experimental y de esa manera se cuantificaron los impactos ambientales producidos.

Tabla 22

Métodos y categorías de impacto ambiental seleccionadas

Método	Categoría de Impacto	Unidad	Aplicación
IPCC 2013 Cambio Climático	Calentamiento Global 100 años	kg CO ₂ -eq	Cuantifica las emisiones de GEI totales del sistema, mediante la evaluación del potencial de calentamiento global, considerando como horizonte de evaluación un tiempo de 100 años.
	Acidificación	kg SO ₂ -eq	Mide la pérdida de la capacidad que tiene el suelo para neutralizar los agentes químicos ácidos, los cuales regresan a este producto de las emisiones a la atmosfera de óxidos de azufre y nitrógeno, además mediante los mecanismos de transporte como la lixiviación y escurrimiento se trasladan al agua.
	Eutrofización	kg P-eq	Cuantifica el incremento desmedido de nutrientes en el medio acuático, los cuales generan a su vez el aumento de la biomasa y destrucción de la diversidad.
ReCiPe 2016	Ecotoxicidad	kg 1,4-DCB	Mide los efectos tóxicos que impactan sobre la superficie, agua dulce y marina. Considera como factor de caracterización la persistencia ambiental, el grado de exposición y el efecto o nivel de toxicidad de un producto químico.
	Toxicidad humana	kg 1,4-DCB	Mide la persistencia y la bioacumulación en la cadena alimenticia humana, causados por el contacto con tóxicos.
	Consumo de agua (directo + indirecto)	m ³	Mide el consumo total de agua del sistema, tanto el consumo directo (empleado en cada proceso y operación unitaria), como el consumo indirecto (agua consumida en la producción de los materiales e insumos empleados).
Demanda de Energía Acumulada	Energía Fósil No renovable	MJ	Mide el consumo de energía fósil del sistema, considerando tanto el gasto de energía por los equipos eléctricos, como la energía fósil empleada en la producción de los materiales e insumos utilizados.

Nota. Adaptado de "Evaluación de la huella de agua, caso de estudio: quesos de pasta semidura", por Falabella *et al.*, 2018, *Instituto Nacional de Tecnología Industrial*.

La fase 4 Interpretación del ACV se incluyó como parte de la sección Discusión de resultados, en la cual se interpretaron y fundamentaron los resultados obtenidos en la fase de evaluación de impacto. Se realizó la comparación de los resultados obtenidos bajo el sistema desarrollado en la investigación y los resultados obtenidos bajo los escenarios propuestos.

V. RESULTADOS

1. Análisis de laboratorio realizados para el ACV del biocombustible

2,5 DMF

1.1. Resultados del análisis de calidad del suelo zona 1 “Cultivos de Cabuya”

Los resultados del análisis de calidad del suelo de la zona 1 “Cultivos de Cabuya”, se muestran en la Tabla 23. Previo tratamiento de la muestra, los análisis se realizaron por ICP-MS, técnica analítica que permite analizar muestras acuosas con concentraciones de analito de 1×10^{-6} mg/L, utilizando el método de ensayo EPA 200.7.1994. Los resultados comprenden dos etapas: en la primera se determinó los parámetros fisicoquímicos referentes a pH, CE, disponibilidad de P, K, materia orgánica y clase textural del suelo (franco arenoso). En la segunda se determinó la concentración de metales livianos (Na, K, Ca, Mg, B) y pesados (Cu, Fe, Mn, Zn) caracterizados como macronutrientes y micronutrientes, los cuales son biológicamente fundamentales en el crecimiento y desarrollo de los cultivos de Cabuya (*Agave americana* L.).

Tabla 23

Análisis de calidad de suelos zona 1 “Cultivos de Cabuya”

Parámetros		Valores
pH		7.27
CE (ds/m) (*)		1.00
P disponible mg/kg		8.49
K disponible mg/kg		272.00
Análisis textural	% Arena	58.00
	% Limo	28.00
	% Arcilla	14.00
	Clase textural	Franco arenoso
Capacidad de Intercambio catiónico meq/100g	Ca ²⁺	12.17
	Mg ²⁺	2.76
	K ¹⁺	0.58
	Na ¹⁺	0.29
	Al ³⁺	<0.01
	Suma de cationes	15.80
	C.I.C.	15.80
Materia orgánica %		4.62
CaCO ₃ %		6.60
Elementos disponibles mg/kg	Ca ²⁺	5350.00
	Mg ²⁺	604.20
	(SO ₄) ²⁻	7.41
	B	1.52
	Cu	5.08
	Fe	25.40
	Mn	29.93
Zn	16.73	

Nota. Adaptado de Informe de Ensayo N° 1-08129/19, por CERPER S.A., 2019.

1.2. Resultados del análisis de calidad del suelo zona 2 “Cultivos Locales”

Los resultados del análisis de calidad del suelo de la zona 2 “Cultivos Locales”, se muestran en la Tabla 24. Previo tratamiento de la muestra los análisis se realizaron por ICP-MS, técnica analítica que permite analizar muestras acuosas con concentraciones de analito de 1×10^{-6} mg/L, utilizando el método de ensayo EPA 200.7.1994. Los resultados comprenden dos etapas: en la primera se determinó los parámetros fisicoquímicos referentes a pH, CE, disponibilidad de P, K, materia orgánica y clase textural del suelo (franco). En la segunda se

determinó la concentración de metales livianos (Na, K, Ca, Mg, B) y pesados (Cu, Fe, Mn, Zn) caracterizados como macronutrientes y micronutrientes, los cuales son biológicamente fundamentales en el crecimiento, desarrollo y subsistencia de los vegetales, animales y el ser humano.

Tabla 24

Análisis de calidad de suelos zona 2 “Cultivos Locales”

Parámetros		Valores
pH		7.45
CE (ds/m) (*)		0.54
P disponible mg/kg		1.45
K disponible mg/kg		256.70
Análisis textural	% Arena	50.00
	% Limo	30.00
	% Arcilla	20.00
	Clase textural	Franco
	Ca ²⁺	14.43
Capacidad de Intercambio catiónico mEq/100g	Mg ²⁺	4.14
	K ¹⁺	0.73
	Na ¹⁺	0.30
	Al ³⁺	<0.01
	Suma de cationes	19.60
Materia orgánica %	C.I.C.	19.60
		1.77
Co ₃ Ca %		5.19
	Ca ²⁺	6805.00
Elementos disponibles mg/kg	Mg ²⁺	616.80
	(SO ₄) ²⁻	4.94
	B	1.20
	Cu	4.23
	Fe	10.50
	Mn	7.93
	Zn	4.47

Nota. Adaptado de Informe de Ensayo N° 1-08130/19, por CERPER S.A., 2019.

1.3. Resultados del análisis para determinar metales en el extracto puro de Cabuya (*Agave americana* L.)

Los resultados del análisis para determinar metales en el extracto puro de Cabuya (*Agave americana* L.), se muestran en la Tabla 25. Previo tratamiento de la muestra los análisis se realizaron por ICP-MS, técnica analítica que permite analizar muestras acuosas con concentraciones de analito de 1×10^{-6} mg/L,

utilizando el método de ensayo EPA 200.7.1994. En los resultados se muestra la presencia de no metales y metales livianos bioacumulados por encima del límite de detección (B, Ba, Ca, K, Mg, P, Sr). Los metales pesados bioacumulados por encima del límite de detección (Al, Cd, Cu, Fe, Mn, Zn) y los no metales, metales livianos y metales pesados que están por debajo del límite de detección (Be, Li, Na, Se, As, Ag, Ce, Co, Cr, Hg, Mo, Ni, Sb, Sn, Pb, Tl, V). La población de la zona consume como bebida alcohólica el extracto de Cabuya (*Agave americana* L.) fermentado que contiene Al (2.41 mg/kg) y Cd (0,2 mg/kg) bioacumulados durante el crecimiento y desarrollo de la planta.

Tabla 25

Análisis para determinar metales en el extracto puro de Cabuya (Agave americana L.)

	Ensayo	LC	Unidad	Resultados
Metales por ICP-MS	Aluminio (Al)	0.25	mg/kg	2.41
	Antimonio (Sb)	0.25	mg/kg	<0.25
	Arsénico (As)	0.06	mg/kg	<0.06
	Bario (Ba)	0.05	mg/kg	0.63
	Berilio (Be)	0.05	mg/kg	<0.05
	Boro (B)	0.25	mg/kg	1.81
	Cadmio (Cd)	0.05	mg/kg	0.20
	Calcio (Ca)	2.50	mg/kg	2 844.00
	Cerio	0.02	mg/kg	<0.02
	Cobalto (Co)	0.05	mg/kg	<0.05
	Cobre (Cu)	0.05	mg/kg	0.39
	Cromo (Cr)	0.05	mg/kg	<0.05
	Estaño (Sn)	0.10	mg/kg	<0.10
	Estroncio (Sr)	0.05	mg/kg	2.23
	Fósforo (P)	0.50	mg/kg	186.00
	Hierro (Fe)	0.20	mg/kg	1.22

Litio (Li)	0.15	mg/kg	<0.15
Magnesio (Mg)	0.35	mg/kg	1 168.00
Manganeso (Mn)	0.05	mg/kg	1.36
Mercurio (Hg)	0.01	mg/kg	<0.01
Molibdeno (Mo)	0.05	mg/kg	<0.05
Níquel (Ni)	0.05	mg/kg	<0.05
Oxido de Silicio	0.54	mg/kg	<0.54
Plata (Ag)	0.05	mg/kg	<0.05
Plomo (Pb)	0.10	mg/kg	<0.10
Potasio (K)	4.50	mg/kg	570.00
Selenio (Se)	0.25	mg/kg	<0.25
Sodio (Na)	1.50	mg/kg	<1.50
Talio (Tl)	0.25	mg/kg	<0.25
Titanio (Ti)	0.15	mg/kg	<0.15
Vanadio (V)	0.05	mg/kg	<0.05
Zinc (Zn)	0.05	mg/kg	5.33

Nota. LC: Limite de cuantificación. Adaptado de Informe de Ensayo N° 1-08045/19, por CERPER S.A., 2019.

1.4. Resultados del análisis para determinar azúcares en el extracto puro de Cabuya (*Agave americana* L.)

Los resultados del análisis para determinar azúcares (monosacárido y disacáridos) en el extracto puro de Cabuya (*Agave americana* L.) se muestran en la Tabla 26. Los análisis se realizaron por HPLC utilizando el método de ensayo AACC 80-0401.11. Los resultados obtenidos corresponden a valores por debajo del límite de detección (<0.70 g/100g) para azúcares individuales (reductores) y para disacáridos (maltosa y sacarosa).

Tabla 26

Análisis para determinar azúcares en extracto puro de Cabuya (Agave americana L.)

Ensayo	LC	Unidad	Resultados	
Fructosa	0.70	g/100 g	<0.70	
Azúcares individuales y totales	Glucosa	0.70	g/100 g	<0.70
	Lactosa	0.70	g/100 g	<0.70
	Maltosa	0.70	g/100 g	<0.70
	Sacarosa	0.70	g/100 g	<0.70
	Azúcares reductores	0.70	g/100 g	<0.70
Azúcares Totales	0.70	g/100 g	<0.70	

Nota. LC: Limite de cuantificación. Adaptado de Informe de Ensayo N° 1-08304/19, por CERPER S.A., 2019.

1.5. Resultado del análisis del extracto hidrolizado de Cabuya

(Agave americana L.)

El resultado del análisis del extracto hidrolizado de Cabuya (*Agave americana L.*) se muestra en la Tabla 27. Los análisis se realizaron por HPLC utilizando el método de ensayo AOAC 977.20. El resultado obtenido representa el 40.22 % de fructosa liberada en la hidrólisis.

Tabla 27

Análisis del extracto hidrolizado

Análisis	Resultado(1)	R.S.D (2)
Fructosa	Fructosa 40.22 %	0.004%

Nota. (1) Porcentaje expresado como masa entre volumen. (2) R.S.D.: Desviación estándar relativa. Adaptado de Informe de Ensayo N° 2150-19, por LABICER, 2019.

1.6. Resultado del análisis de la muestra deshidratada

El resultado del análisis de la muestra deshidratada se indica en la Tabla 28. El análisis se realizó por cromatografía de gases con Detector de Ionización de

Llama (FID), utilizando el método de ensayo EPA 8015B. El resultado demuestra la presencia del compuesto 5-HMF (0.008 mg/L) en la muestra deshidratada.

Tabla 28

Análisis de la muestra deshidratada

Archivo de Cromatograma	Muestra	HMF Tr	Concentración HMF mg/mL
MP-std	Muestra Patrón	28.900	0.765
FOE	Muestra fase orgánica	29.010	0.008

Nota. Tr: Tiempo de reacción. Adaptado de Informe de Ensayo N° 21-20-19, por Laboratorio de Investigación y Química Aplicada UNI, 2019.

2. Fases del ACV del 2,5 DMF

2.1. Fase 1 Definiciones

a. Propósito del ACV del biocombustible 2,5 DMF

Analizar los impactos ambientales negativos en el agua, aire y energía, generados en el ciclo de vida del biocombustible 2,5-DMF, identificando los procesos críticos para reemplazarlos en los escenarios propuestos.

b. Unidad Funcional (UF)

La UF estudiada fue 1 L de biocombustible 2,5 DMF.

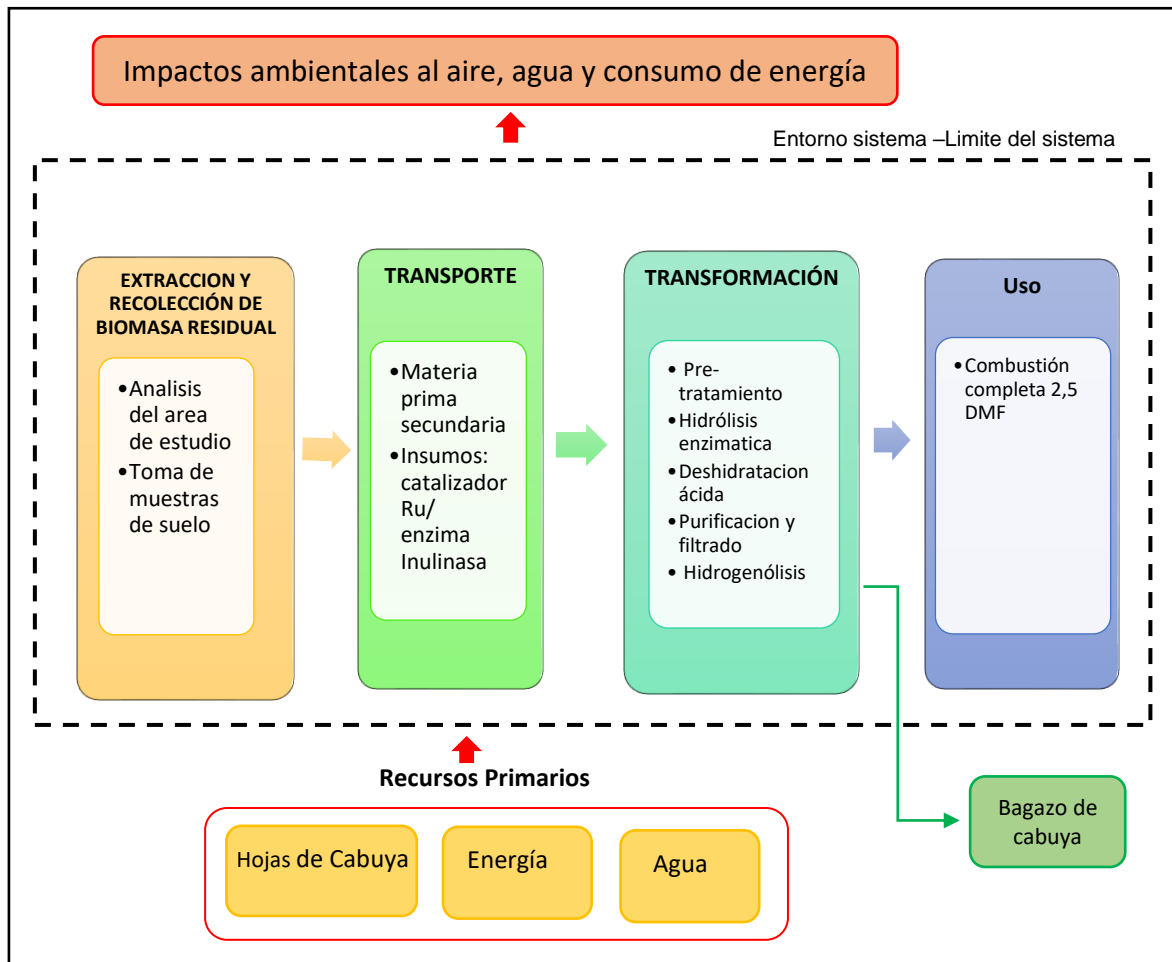
c. Alcance

El alcance del ACV del biocombustible 2,5 DMF comprendió el desarrollo de 4 etapas: extracción y recolección de las hojas de Cabuya (*Agave americana* L.), transporte de materia prima e insumos importados, conversión de la biomasa residual y la etapa de uso (ver Figura 9). En ese sentido, se encuentran fuera del alcance el ACV del biocombustible 2,5 DMF, la fase de cultivo de la planta, el cambio indirecto de uso de suelo, la distribución hacia el usuario final y el análisis económico. Por lo tanto, el ACV realizado tuvo una perspectiva de la “tumba a la

tumba”, puesto que inicia con la recolección de biomasa residual (fin de vida de la planta) y finaliza con el uso (quema del biocombustible).

Figura 9

Límites del sistema del ciclo de vida del biocombustible 2,5 DMF



2.2. Fase 2 Análisis de Inventario

Los valores de los flujos de entrada y salida correspondiente a cada producto intermedio obtenido en el desarrollo del ciclo de vida del biocombustible 2,5 DMF se muestran en las Tablas 29 y 30 respectivamente. Los resultados del análisis de inventario corresponden al resumen de los cálculos y mediciones realizadas en cada etapa de la recopilación de datos.

Tabla 29
Resumen de los flujos de entrada por cada producto intermedio del sistema desarrollado

Entradas	Unid.	Biomasa residual útil ¹	Biomasa pre-tratada ²	Extracto Cabuya ³	Disol. Extracto Cabuya ⁴	Disol. Fructosa ⁵	Disol. 5-HMF ⁶	Biocom. 2,5 DMF ⁷
Bolsas de plástico (polietileno de baja densidad)	g	5.00	--	--	--	--	--	--
Alcohol medicinal (etanol)	g	15.78	--	--	--	--	--	--
Papel periódico (reciclado)	g	15.00	--	--	--	--	--	--
Transporte terrestre materia prima secundaria – Tramo 1 (bus/ 70 pasajeros)	km/persona	12.09	--	--	--	--	--	--
Transporte terrestre materia prima secundaria – Tramo 2 (auto/3 pasajeros)	km	72.67	--	--	--	--	--	--
Transporte terrestre materia prima secundaria – Tramo 3 (auto/ 1 pasajero)	km	13.70	--	--	--	--	--	--
Hojas de Cabuya recolectadas	kg	1.00	--	--	--	--	--	--
Biomasa residual útil	kg	--	0.82	--	--	--	--	--
Agua de grifo	L	--	0.50	--	--	--	--	--
Consumo eléctrico - cocinado (Pretratamiento)	kW-h	--	0.40	--	--	--	--	--
Biomasa residual pretratada	kg	--	--	0.54	--	--	--	--
Consumo eléctrico - Prensado	kW-h	--	--	0.60	--	--	--	--
Agua de grifo (lavado de materiales)	L	--	--	0.50	--	--	--	--
Extracto de cabuya puro	L	--	--	--	0.25	--	--	--
Consumo eléctrico - filtrado	kW-h	--	--	--	0.10	--	--	--
Agua ultrapura –dilución	L	--	--	--	4.73	--	--	--
Disolución de extracto de cabuya	L	--	--	--	--	4.98	--	--
Enzima Inulinasa Aspergillus Niger	mg	--	--	--	--	311.50	--	--
Transporte aéreo de enzima Inulinasa (tramo 1)	kgkm	--	--	--	--	1.81	--	--
Transporte terrestre de enzima Inulinasa (tramo 2)	kgkm	--	--	--	--	0.01	--	--
solución amortiguadora a pH 5,5 (sal fosfato)	g	--	--	--	--	40.34	--	--
Agua ultrapura	L	--	--	--	--	1.25	--	--
Agua de grifo	L	--	--	--	--	1.00	--	--
Consumo eléctrico horno disolución de fructosa	kW-h	--	--	--	--	9.97	--	--
Catalizador ácido HCl	L	--	--	--	--	--	6.23	--
Solvente 1-butanol	g	--	--	--	--	--	0.28	--
Sal NaCl	kg	--	--	--	--	--	20.00	--
Agua ultrapura	kg	--	--	--	--	--	6.54	--
Agua de grifo	kg	--	--	--	--	--	12.66	--
Consumo eléctrico-agitador magnético con calentador	L	--	--	--	--	--	4.00	--
Bicarbonato de sodio	kW-h	--	--	--	--	--	2.23	--
disolución 5-HMF	g	--	--	--	--	--	51.68	--
Rutenio	kg	--	--	--	--	--	--	23.36
Transporte aéreo de Catalizador Ru/C (tramo 1)	g	--	--	--	--	--	--	35.01
	kgkm	--	--	--	--	--	--	212.85

Transporte terrestre de Catalizador Ru/C (tramo 2)	kgkm	--	--	--	--	--	--	0.85
Consumo eléctrico del reactor	kW-h	--	--	--	--	--	--	45.00
Hidrógeno	g	--	--	--	--	--	--	56.00

Nota. ¹ Biomasa residual útil: comprende las etapas de extracción y recolección de la biomasa residual y el transporte de la biomasa residual. ² Biomasa pre tratada: abarca el pretratamiento (lavado, cortado y cocción). ³ Extracto de Cabuya: comprende la operación de prensado. ⁴ Disolución de extracto: comprende operaciones unitarias de filtrado y dilución. ⁵ Disolución de fructosa: abarca el proceso de hidrólisis enzimática y transporte de enzima. ⁶ Disolución de 5-HMF: comprende el proceso de Deshidratación ácida y extracción y purificación de fase orgánica. ⁷ Biocombustible 2,5 DMF: abarca proceso de hidrogenólisis, transporte de catalizador, separación y extracción de biocombustible 2,5 DMF.

Tabla 30

Resumen de los flujos de salida por cada producto intermedio del sistema desarrollado

Salidas	Unidad	Biomasa residual útil	Biomasa pretratada	Extracto Cabuya	Disol. extracto Cabuya	Disol. Fructosa	Disol. 5-HMF	Biocom. 2,5 DMF
Residuos de bolsas plásticas	g	5.00	--	--	--	--	--	--
Residuos de papel periódico	g	15.00	--	--	--	--	--	--
Emisiones de CO ₂ debido al transporte terrestre de materia prima secundaria (Tramo 1° ida y vuelta). Bus/ 70 pasajeros	kg	8.17	--	--	--	--	--	--
Emisiones de CH ₄ debido al transporte terrestre de materia prima secundaria (Tramo 1° ida y vuelta). Bus/ 70 pasajeros.	kg	0.43 x 10 ⁻³	--	--	--	--	--	--
Emisiones de N ₂ O debido al transporte terrestre de materia prima secundaria (Tramo 1° ida y vuelta). Bus/ 70 pasajeros.	kg	0.43 x 10 ⁻³	--	--	--	--	--	--
Emisiones de CO ₂ debido al transporte terrestre de materia prima secundaria (Tramo 2° ida y vuelta). Automóvil / 3 pasajeros	kg	13.00	--	--	--	--	--	--
Emisiones de CH ₄ debido al transporte terrestre de materia prima secundaria (Tramo 2° ida y vuelta). Automóvil / 3 pasajeros	kg	0.70 x 10 ⁻³	--	--	--	--	--	--
Emisiones de N ₂ O debido al transporte terrestre de materia prima secundaria (Tramo 2° ida y vuelta). Automóvil / 3 pasajeros	kg	0.11 x 10 ⁻²	--	--	--	--	--	--
Emisiones de CO ₂ debido al transporte terrestre de materia prima secundaria (Tramo 3° solo ida). Automóvil/ 1 pasajero.	kg	2.45	--	--	--	--	--	--
Emisiones de CH ₄ debido al transporte terrestre de materia	kg	0.13 x 10 ⁻³	--	--	--	--	--	--

prima secundaria (Tramo 3° solo ida). Automóvil/ 1 pasajero								
Emisiones de N ₂ O debido al transporte terrestre de materia prima secundaria (Tramo 3° solo ida). Automóvil/ 1 pasajero	kg	0.20 x 10 ⁻³	--	--	--	--	--	--
Biomasa residual útil (producto intermedio)	kg	0.82	--	--	--	--	--	--
Residuos de biomasa recolectada (deteriorada)	kg	0.18						
Agua de lavado	L	--	0.50	--	--	--	--	--
Residuo de biomasa vegetal (trozos no usados, puntas y espinas)	kg	--	0.28	--	--	--	--	--
Biomasa pretratada	kg	--	0.54	--	--	--	--	--
Agua de lavado	L	--		0.50	--	--	--	--
Residuos de biomasa vegetal (trozos no utilizados y bagazo de cabuya)	kg	--	--	0.35	--	--	--	--
Extracto puro de cabuya (producto intermedio)	L	--	--	0.25	--	--	--	--
Residuos de partículas sólidas orgánicas retenidas en filtrado	g	--	--	--	90.48	--	--	--
Disolución de extracto de cabuya	L	--	--	--	4.98	--	--	--
Agua de lavado	L	--	--	--	--	1.00	--	--
Disolución de fructosa	L	--	--	--	--	6.23	--	--
Emisiones de CO ₂ debido al transporte aéreo de enzima Inulinasa	kg	--	--	--	--	118 387.60	--	--
Emisiones de CH ₄ debido al transporte aéreo de enzima Inulinasa	kg	--	--	--	--	0.83	--	--
Emisiones de N ₂ O debido al transporte aéreo de enzima Inulinasa	kg	--	--	--	--	3.31	--	--
Emisiones de CO ₂ debido al transporte terrestre de enzima Inulinasa	kg	--	--	--	--	5.73	--	--
Emisiones de CH ₄ debido al transporte terrestre de enzima Inulinasa	g	--	--	--	--	0.31	--	--
Emisiones de N ₂ O debido al transporte terrestre de enzima Inulinasa	g	--	--	--	--	0.47	--	--
Agua de lavado	L	--	--	--	--	--	4.00	--
Fase acuosa 1 (se recircula a proceso de deshidratación, se consideró como producto evitado.	L	--	--	--	--	--	14.00	--
	L	--	--	--	--	--	2.58	--

Fase acuosa 2 (agua residual para tratamiento)								
Partículas de sal reciclada-producto evitado (se recircula a proceso de deshidratación acida)	kg	--	--	--	--	--	5.88	
Disolución de 5-HMF (fase orgánica purificada)	kg	--	--	--	--	--	23.36	--
Emisiones de CO ₂ debido al transporte aéreo de catalizador Ru/C	kg	--	--	--	--	--	--	123 292.80
Emisiones de CH ₄ debido al transporte aéreo de catalizador Ru/C	kg	--	--	--	--	--	--	0.86
Emisiones de N ₂ O debido al transporte aéreo de catalizador Ru/C	kg	--	--	--	--	--	--	3.45
Emisiones de CO ₂ debido al transporte terrestre de catalizador Ru/C	kg	--	--	--	--	--	--	5.72
Emisiones de CH ₄ debido al transporte terrestre de catalizador Ru/C	kg	--	--	--	--	--	--	0.31 x 10 ⁻³
Emisiones de N ₂ O debido al transporte terrestre de catalizador Ru/C	kg	--	--	--	--	--	--	0.47 x 10 ⁻³
Fase acuosa recirculada (producto evitado)	L	--	--	--	--	--	--	3.00
Solvente transportador recuperado y recirculado (producto evitado)	kg	--	--	--	--	--	--	19.00
Biocombustible 2,5 DMF	L	--	--	--	--	--	--	1.00

2.3. Fase 3 Evaluación de Impacto Ambiental

a. Método Cambio Climático IPCC 2013

El total de emisiones calculadas mediante la categoría de impacto Calentamiento Global para la generación de 1 L de biocombustible 2,5 DMF se muestra en la Tabla 31. El resultado neto alcanza un valor de 2.44×10^5 kg CO₂-eq por efecto de las emisiones específicas generadas debido al transporte de insumos importados, el proceso de hidrólisis enzimática y la hidrogenólisis.

Tabla 31

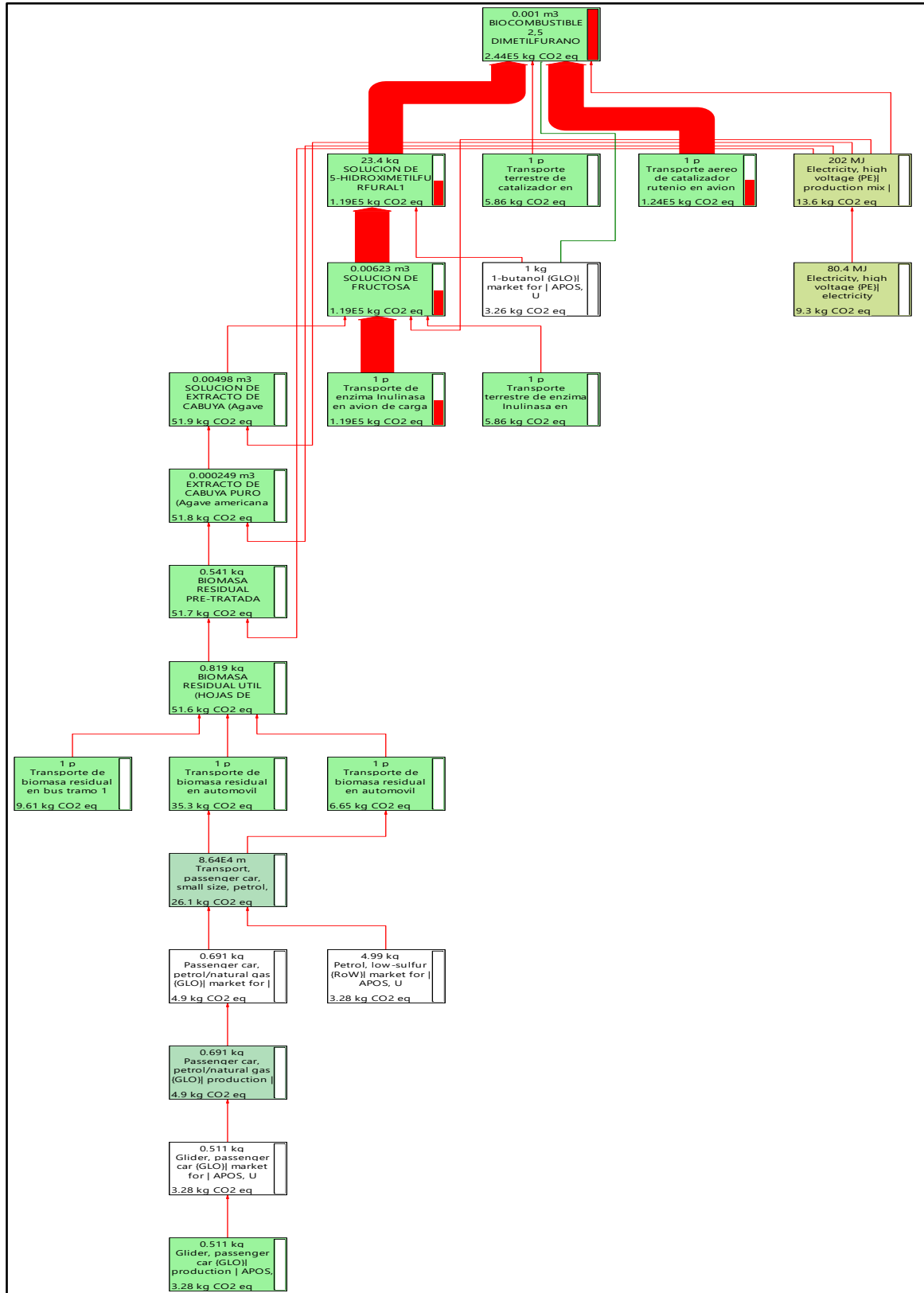
Cuantificación de emisiones totales del sistema desarrollado

Categoría de Impacto Calentamiento Global 100 años para UF (1 L de biocombustible 2,5 DMF)	
Productos Intermedios/ Final	Valor (kg CO₂- eq)
Biomasa residual útil	51.80
Biomasa residual pretratada	51.90
Extracto de cabuya puro	52.00
Disolución de extracto	52.10
Disolución de fructosa	1.19 x 10 ⁵
Disolución de 5-Hidroximetilfurfural	1.20 x 10 ⁵
Biocombustible 2,5 Dimetilfurano	2.44 x 10 ⁵

El Diagrama de Red obtenido del software SimaPro se muestra en la Figura 10, en donde se observa la contribución de emisiones específicas de cada proceso desarrollado al valor total de emisiones del sistema (ACV del biocombustible 2,5 DMF). Asimismo, Las flechas rojas de mayor grosor indican mayor contribución de emisiones de GEI y las flechas delgadas señalan menor contribución. Las barras laterales ubicadas en cada proceso muestran el nivel de contribución individual al resultado neto de emisiones.

Figura 10

Diagrama de Red del biocombustible 2,5 DMF analizado mediante categoría Calentamiento Global (Método IPCC-2013)



Nota. Tomado de software de cálculo SimaPro

Los resultados de las emisiones en la etapa de uso del biocombustible se indican en la Tabla 32, se consideró las emisiones totales generadas en la combustión completa del biocombustible 2,5 DMF. Las evaluaciones fueron comparadas para diferentes cargas del motor utilizando combustibles comerciales como gasolina sin plomo y etanol anhidro.

Tabla 32

Emisiones de GEI generadas por la combustión de 1 L de cada combustible

Combustible	IMEP 3.5 (kg CO ₂ -eq)	IMEP 8.5 (kg CO ₂ -eq)
2,5 DMF	3.63	3.42
Etanol anhidro	3.08	2.89
Gasolina sin plomo	2.82	2.90

b. Método de Evaluación Recipe-2016

Los resultados de los impactos por degradación del agua del sistema desarrollado se muestran en la Tabla 33. Dichos valores corresponden a los productos intermedios obtenidos en las operaciones y procesos unitarias del ciclo de vida del 2,5 DMF. Se aprecia que los procesos que contribuyen en mayor medida al consumo neto de agua del sistema son la hidrogenólisis y la deshidratación ácida. Los resultados obtenidos en la categoría Acidificación tienen influencia por la cantidad de SO₂ equivalente proveniente de la combustión en el transporte como en los procesos industriales para la producción de los insumos empleados. En la categoría Eutrofización los valores indican una contribución de los procesos debido a la cantidad de P equivalente proveniente de efluentes con alta carga orgánica. En la categoría Ecotoxicidad se observa mayor contribución por efecto del transporte y consumo de energía. En la

categoría Toxicidad humana influye la persistencia de 1,4-DCB como contribución del proceso de deshidratación acida.

Tabla 33

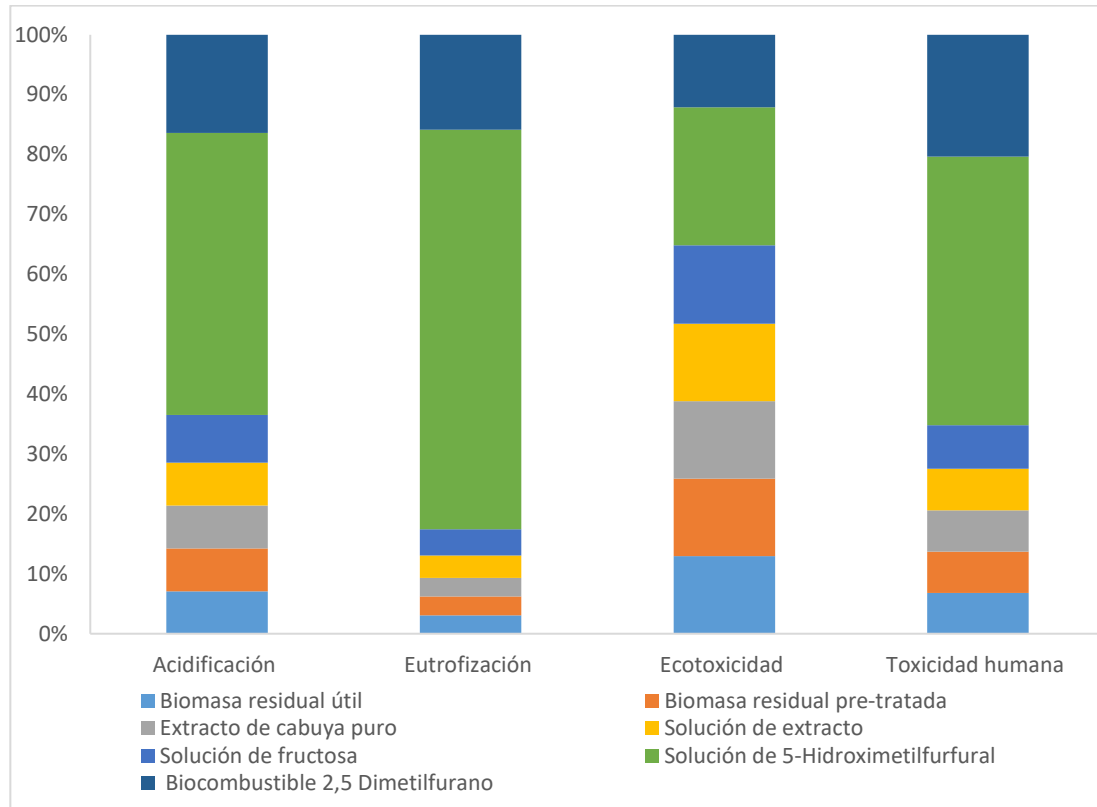
Cuantificación de los impactos en el agua por el sistema desarrollado

Productos Intermedios/ Final	Categorías de impacto evaluadas mediante método Recipe-2016 para UF (1 L de biocombustible 2,5 DMF)				
	Consumo de agua (m ³)	Acidificación (kg SO ₂ - eq)	Eutrofización (kg P-eq)	Ecotoxicidad (kg 1,4-DCB)	Toxicidad humana (kg 1,4-DCB)
Biomasa residual útil	0.026	0.046	0.001	137.645	10.730
Biomasa residual pretratada	0.056	0.046	0.001	137.655	10.830
Extracto puro	0.101	0.046	0.001	137.845	10.832
Disolución de extracto	0.115	0.047	0.001	137.845	10.835
Disolución de fructosa	0.867	0.052	0.002	140.102	11.498
Disolución de 5-HMF	3.180	0.305	0.025	267.986	70.360
Biocombustible 2,5 DMF	4.548	0.106	0.006	156.020	31.976

El aporte porcentual de cada producto intermedio a las categorías de impacto evaluadas del sistema desarrollado mediante el Método Recipe-2016 se presenta en la Figura 11. En donde se puede observar de forma gráfica el nivel de contribución de cada producto intermedio al resultado neto.

Figura 11

Aporte porcentual por cada producto intermedio a las categorías de impacto evaluadas del sistema desarrollado mediante el Método Recipiente-2016



c. Método Demanda de Energía Acumulada (LHV)

Los resultados obtenidos en la categoría Energía Fósil No renovable se indican en la Tabla 34. Dichos valores demuestran que el proceso de deshidratación ácida consume mayor cantidad de energía fósil. Permitiendo apreciar una importante reducción en el valor neto respecto al penúltimo producto intermedio y restringiendo la formación de otros productos al ser recirculados al sistema.

Tabla 34

Cuantificación del consumo de energía fósil del sistema desarrollado

Categoría de impacto Energía fósil no renovable para UF (1 L de biocombustible 2,5 DMF)	
Productos Intermedios/ Final	Valor (MJ)
Biomasa residual útil	359.00
Biomasa residual pre-tratada	360.00
Extracto puro	363.00
Disolución de extracto	363.00
Disolución de fructosa	402.00
Disolución de 5-HHMF	1.92 x 10 ³
Biocombustible 2,5 DFM	665.00

Rendimiento energético del 2,5 DMF

El rendimiento energético calculado bajo un escenario de producción local, sin necesidad de importar insumos fue de 0.38, dicho resultado se debe a que 1 L de biocombustible bajo estas condiciones consume 82.30 MJ de energía fósil, considerando como dato de valor calorífico del 2,5 DMF 31.5 MJ/L.

3. Variabilidad de los impactos en el sistema desarrollado

Los resultados de la variabilidad de los impactos en el sistema desarrollado se muestran en la Tabla 35, en donde la variación de los impactos del aire, agua y energía fueron evaluados para distintas cantidades de biocombustible 2,5 DMF, observando que el aumento en la producción de 2,5 DMF produce un incremento en los impactos, por utilizar mayor cantidad de energía fósil en el transporte y producción de insumos, además de un mayor consumo de agua e incremento de residuos del sistema.

Tabla 35

Variabilidad de impactos al aire, agua y energía del sistema desarrollado

Biocombustible 2,5 DMF (L)	Emisiones GEI (kg CO ₂ -eq)	Consumo de agua (m ³)	Eutrofización (kg P-eq)	Acidificación (kg SO ₂ -eq)	Ecotoxicidad (kg 1,4 DCB)	Toxicidad humana (kg 1,4 DCB)	Consumo de energía fósil (MJ)
1	243605.48	4.55	0.01	0.12	162.50	31.98	665.01
10	243669.25	14.67	0.02	0.29	274.89	72.72	1887.78
20	243811.91	25.92	0.04	0.51	399.76	117.98	3246.76
30	243882.85	37.18	0.05	0.72	524.63	163.25	4605.83
40	243953.79	48.42	0.07	0.94	649.50	208.52	5964.90
50	244309.46	60.42	0.09	1.16	775.77	254.14	7323.99
100	243605.48	115.93	0.17	2.22	1398.73	480.12	14119.47

4. Análisis de Incertidumbre

4.1. Análisis de Monte Carlo

Los resultados del análisis de incertidumbre mediante la simulación de Monte Carlo para cada categoría de impacto evaluada se indican en la Tabla 36. Dicho análisis fue realizado en base a un intervalo de confianza del 95%, observando que la mayoría de categorías evaluadas presentan un nivel de incertidumbre bajo, siendo la desviación estándar de cada categoría de impacto dividida por la media menor a 0.3. La categoría Cambio Climático posee menor incertidumbre acumulada. Las categorías Eutrofización y Consumo de Agua obtuvieron un porcentaje de variación alto, lo que indica una mayor incertidumbre con valores de confianza distanciados de la media.

Tabla 36

Simulación de Monte Carlo para los impactos ambientales caracterizados del sistema desarrollado

Categorías de Impacto	Unidad	Media	SD	CV	2,5 %	97.5 %	SEM
Calentamiento Global	kg CO ₂ -eq	2.44 x 10 ⁵	0.84	0.0003%	2.44 x 10 ⁵	2.44 x 10 ⁵	0.03
Acidificación	kg SO ₂ -eq	0.11	0.01	5.44%	0.10	0.12	0.20 x 10 ⁻³
Eutrofización	kg P-eq	0.60 x 10 ⁻²	0.20 x 10 ⁻²	40.50%	0.30 x 10 ⁻²	0.011	7.40 x 10 ⁻⁵
Ecotoxicidad	kg 1,4-DCB	155.00	21.50	13.90%	127.00	211.00	0.68
Toxicidad Humana	kg 1,4-DCB	30.30	6.36	21%	22.40	45.60	0.20
Consumo de agua	m ³	4.35	5.86	135%	-9.13	14.90	0.19
Energía Fósil No renovable	MJ	664.00	32.50	4.90%	602.00	732.00	1.03

Nota. SD= Desviación típica; CV= Coeficiente de Variación; SEM= Error estándar de la media.

4.2. Incertidumbre de la calidad de datos mediante matriz de Pedigree

Los resultados del análisis de incertidumbre de la calidad de datos mediante la matriz de pedigree se muestran en la Tabla 37. Dichos valores fueron obtenidos en base a la categoría del impacto Calentamiento Global, debido a que esta categoría representa las emisiones directas de GEI generadas durante el ciclo de vida del biocombustible 2,5 DMF.

La Incertidumbre Total (U_T) estuvo representada por la Desviación Estándar Geométrica de las emisiones de GEI de cada producto intermedio. La varianza geométrica fue más alta en los procesos unitarios de hidrólisis enzimática (disolución de fructosa) e hidrogenólisis (biocombustible 2,5 DMF) y generó una mayor incertidumbre relacionada con la Integridad, Correlación Temporal y

Correlación Tecnológica, debido a que los datos fueron obtenidos a menor escala y empleando materiales de diferente tecnología.

Tabla 37

Análisis de incertidumbre de calidad de datos para el potencial de calentamiento Global del sistema desarrollado

Producto del proceso	Incertidumbre adicional (U_a)					U_b	Varianza	Desviación estándar geométrica (U_T)
	Fi	In	Ct	Cg	Cte			
Biomasa residual útil	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.05	1.05	1.03
Biomasa residual pretratada	1.00	2.00	1.00	1.00	1.00	1.05	1.05	1.03
Extracto puro	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	1.05	1.11	1.06
Disolución de extracto	1.00	1.00	1.00	1.00	3.00	1.05	1.11	1.06
Disolución de fructosa	1.00	3.00	1.00	1.00	3.00	1.05	1.13	1.06
Disolución de 5-HMF	1.00	2.00	1.00	1.00	3.00	1.05	1.12	1.06
Biocombustible 2,5 DMF	2.00	5.00	3.00	2.00	3.00	1.05	1.25	1.12

Nota. Fi= Fiabilidad; In= Integridad; Ct= Correlación temporal; Cg= Correlación geográfica; Cte= Correlación tecnológica; U_b = Incertidumbre básica (Factor ambiental).

5. Análisis de Sensibilidad (escenarios propuestos)

5.1. Cuantificación y variabilidad de los impactos bajo escenarios propuestos

Los resultados de la evaluación realizada bajo el EP N° 1 se indican en la Tabla 38, demostrando una clara reducción de las emisiones totales, debido a que dicho escenario contempla condiciones favorables para el sistema como la sustitución de procesos críticos, los cuales contribuyen a la reducción de las emisiones específicas de GEI.

Los resultados de impactos para el EP N° 2 se muestran en la Tabla 38, en donde se evidencia un incremento sustancial de los impactos por degradación del agua, debido a que este escenario no contempló una etapa de recirculación de productos, ocasionando de esta manera mayor consumo de materiales y generación de residuos.

El resultado de la evaluación bajo el EP N° 3 presentado en la Tabla 38 refleja una reducción en el consumo neto de energía fósil del sistema, resultando beneficioso para este escenario al contemplar condiciones favorables para la producción del biocombustible 2,5 DMF, como el uso del bagazo de Cabuya (*Agave americana* L.) para la generación de energía y la adquisición de insumos en un mercado local.

Tabla 38

Variabilidad de impactos al aire, agua y energía bajo escenarios propuestos

Biocombustible 2,5 DMF (L)	Evaluación EP N° 1		Evaluación EP N° 2				Evaluación EP N° 3
	Emisiones GEI (kg CO ₂ -eq)	Consumo de agua (m ³)	Eutrofización (kg P-eq)	Acidificación (kg SO ₂ -eq)	Ecotoxicidad (kg 1,4 DCB)	Toxicidad humana (kg 1,4 DCB)	Consumo de energía fósil (MJ)
1	149.64	6.56	0.03	0.29	164.75	66.44	87.18
10	216.07	35.39	0.26	2.70	1587.96	649.51	871.84
20	289.37	67.42	0.51	5.39	3169.31	1297.37	1743.37
30	364.37	99.46	0.77	8.07	4750.65	1945.23	2615.06
40	438.37	131.49	1.03	10.76	6331.99	2593.09	3486.85
50	511.37	163.53	1.29	13.44	7913.34	3240.95	4358.54
100	881.38	323.71	2.57	26.87	15820.05	6480.25	8716.87

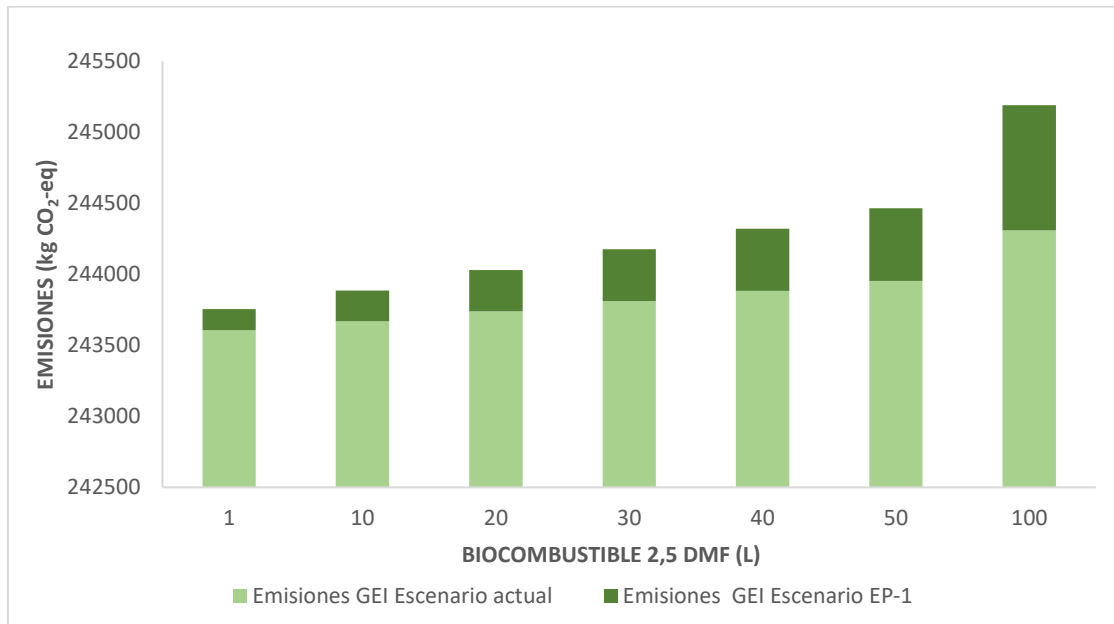
5.2. Comparación de impactos ambientales del sistema desarrollado y los escenarios propuestos

La comparación de las emisiones totales calculadas bajo el escenario desarrollado y el EP N° 1 se muestran en la Figura 12. En donde se observa una

considerable reducción de emisiones de GEI en el EP N°1, indicando que las condiciones planteadas en dicho escenario favorecen la reducción de emisiones totales.

Figura 12

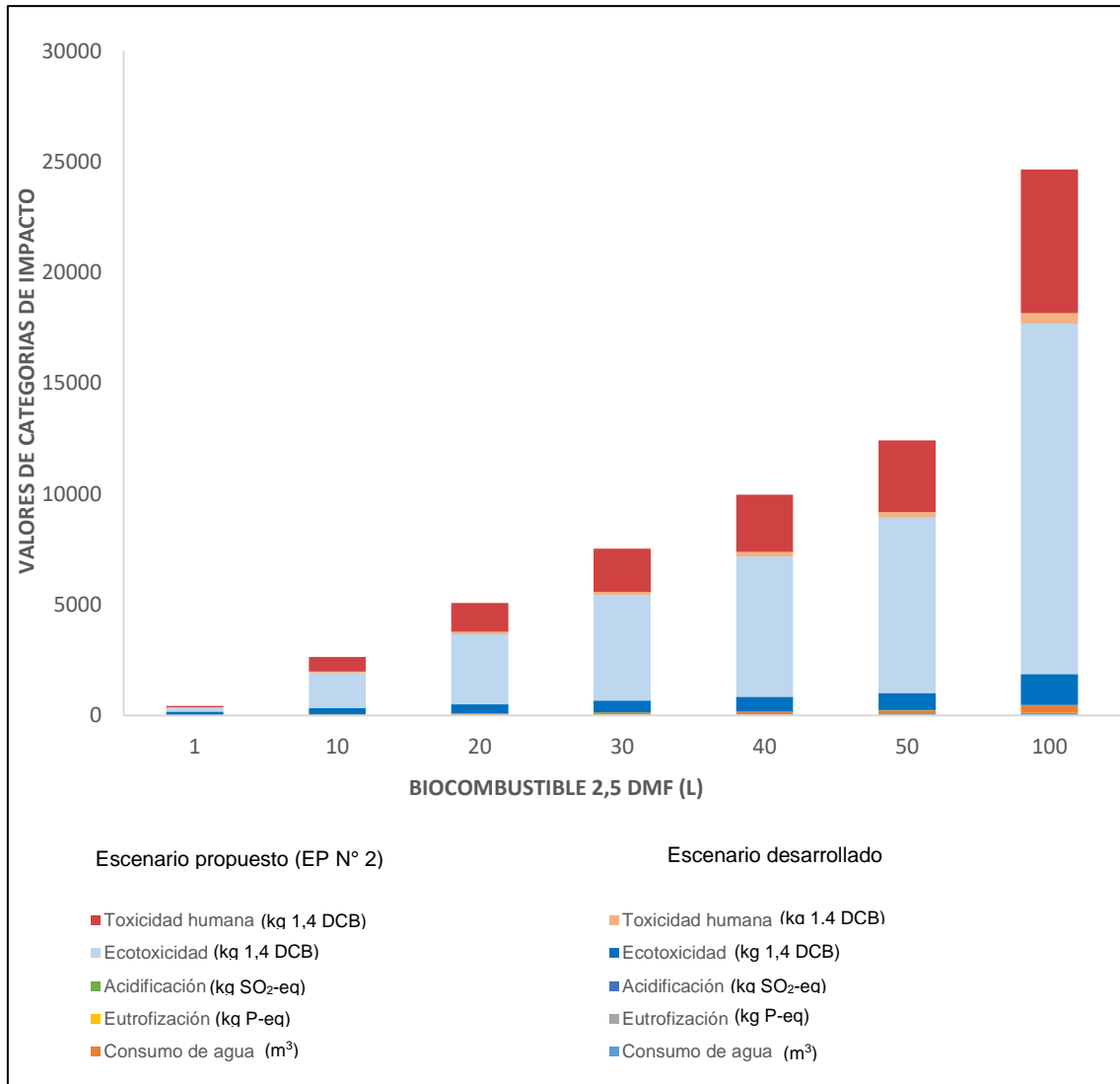
Comparación de emisiones totales entre sistema desarrollado y EP N° 1



La comparación de los resultados obtenidos en el escenario desarrollado y el EP N° 2 se presentan en la Figura 13. En donde se evidencia un incremento de los impactos por degradación del agua en el EP N° 2, dado que este escenario no contempla la recirculación de materiales en el sistema. Por lo que, a medida que aumenta la producción del biocombustible 2,5 DMF se utilizarán mayor cantidad de insumos y se generarán también mayor cantidad de residuos al ambiente.

Figura 13

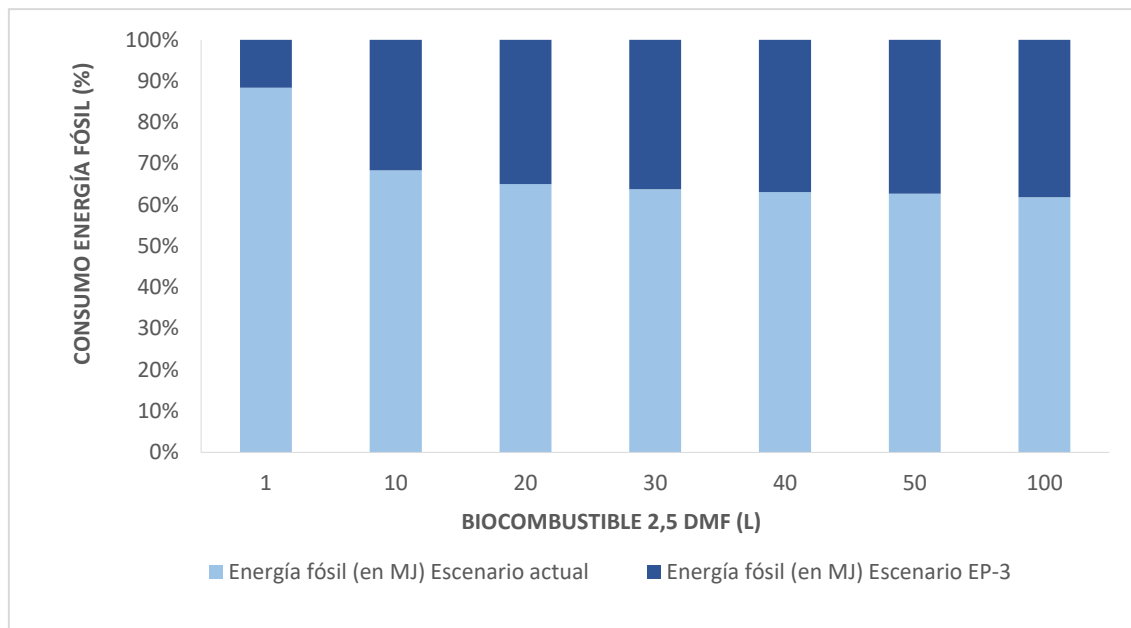
Comparación de impactos al agua entre el sistema desarrollado y EP N° 2



El resultado de la comparación entre el escenario desarrollado y el EP N° 3 se presenta en la Figura 14. Se aprecia una notable reducción del consumo de energía fósil en el EP N° 3 debido a la sustitución de los procesos críticos con alto consumo de energía fósil y el uso de energía por cogeneración.

Figura 14

Comparación de consumo de energía fósil entre el sistema desarrollado y EP N° 3



VI. DISCUSION

1. Análisis de calidad del suelo zonas 1 y 2

Los suelos evaluados son secos con tendencia a ser básicos pH = 7.27 en la zona 1 (ver Tabla 23) y pH = 7.45 en la zona 2 (ver Tabla 24) bajo estas condiciones presentan mayor capacidad de intercambio catiónico por la presencia de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{1+} , Na^{1+} (ver Anexos 5 y 6) y menor actividad de los metales pesados caracterizados como elementos trazas. El suelo evaluado es de buena calidad para el cultivo de la Cabuya (*Agave americana* L.) en la zona 1, es franco arenoso y tiene buena disponibilidad de fósforo (P = 8.49 mg/kg). En la zona 2 el suelo es franco y tiene menor disponibilidad de fósforo (P = 1.45 mg/kg) debido a la rotación de cultivos que capturan el fósforo disponible en el suelo. La Cabuya (*Agave americana* L.) es eficiente en la producción de biomasa a pesar del estrés hídrico, debido a su gran capacidad para capturar carbono, lo que contribuye a su vez con la mitigación del cambio

climático, además la abertura de su follaje formado por hojas carnosas cubre el suelo y evita la pérdida de agua en el binomio suelo-raíz, por lo que no necesita riego continuo, fertilizantes y plaguicidas (García *et al.*, 2011; Saulino, 2011; Rivera, 2016).

2. Análisis en el extracto de Cabuya (*Agave americana* L.)

El extracto es ácido pH = 4.85 a 20°C y a la misma temperatura la densidad es 1.04 g/mL. La población utiliza este recurso por el contenido de carbohidratos para elaborar miel con la denominación “miel de Cabuya” y por fermentación obtienen una bebida alcohólica que consumen en diferentes ceremonias. El resultado del análisis de metales livianos y pesados se muestran en la Tabla 25, los grupos disponibles encontrados son: macrominerales Ca (2844 mg/kg), P (186 mg/kg), K (570 mg/kg) y Mg (1168 mg/kg), elementos traza: Fe (1.22 mg/kg), Cu (0.39 mg/kg), Zn (5.33 mg/kg) y Mn (1.36 mg/kg) y elementos que no cumplen ninguna función biológica Al (2.51 mg/L), Cd (0.21 mg/L), Sr (2.32 mg/L). El Al se encuentra ampliamente distribuido en el ambiente, la EPA ha recomendado un nivel secundario de contaminante máximo de 0.05 a 0.2 mg/L para el Al en el agua potable. La EPA ha determinado que no se espera que la exposición durante toda la vida a 0.005 mg/L de Cd cause efectos adversos. Las principales fuentes de exposición al Sr son los alimentos y el agua potable, la EPA para cuidar la salud pública ha establecido un límite de 0.004 mg/L en agua potable (Rivera, 2016).

3. Análisis de Impactos en categoría Calentamiento Global

La producción de 1 L de biocombustible 2,5 DMF evaluado mediante la categoría Calentamiento Global emite en total 2.44×10^5 kg CO₂-eq (ver Tabla 31). Este valor se debe a las emisiones específicas generadas por la importación de

insumos que considera un transporte aéreo de larga distancia para trasladar la enzima Inulinasa y el catalizador CuRu/C. Se evidencia que los procesos de hidrólisis enzimática e hidrogenólisis generan mayor cantidad de emisiones. Asimismo, se observa en el resultado neto una reducción de emisiones respecto al penúltimo proceso, debido a que se logra recircular el solvente recuperado 1-butanol. El uso de técnicas como la recirculación y el reúso de efluentes líquidos generados en los procesos, junto con procesos eficientes y sostenibles contribuyen sustancialmente en la reducción de impactos al ambiente, además mediante el empleo de tecnología moderna y catalizadores óptimos se lograría mejorar la eficiencia de conversión de monosacáridos a 2,5 DMF (Saulino, 2011; Qian *et al.*, 2015).

El resultado de las emisiones generadas durante el proceso de combustión interna de 1 L de combustible de 2,5 DMF es 3.42 kg CO₂-eq, dicho valor es 18.34% mayor que las emisiones del etanol anhidro (2.89 kg CO₂-eq) y 17.93% mayor que las de gasolina sin plomo (2.9 kg CO₂-eq) (ver Tabla 32). El mayor porcentaje de emisión del 2,5 DMF está influenciado por tener mayor densidad (0.89 g/mL) que los otros combustibles indicados, además la rápida velocidad de combustión le permite liberar energía, alcanzando en el sistema altas temperatura que favorecen la generación de emisiones de NO_x y CO respecto al etanol y la gasolina (Shaohua *et al.*, 2010; Qian *et al.*, 2015).

4. Análisis de Impactos en método Recipe-2016

Los resultados de la evaluación de la huella hídrica medida bajo el consumo de agua total para la generación de 1 L de biocombustible 2,5 DMF fue de 4.55 m³ (ver Tabla 33), este valor incluye el consumo de agua directo de cada proceso

como el consumo indirecto de agua, empleada en la generación de los materiales requeridos. Para desarrollar la reacción de hidrogenólisis se utiliza energía eléctrica, de acuerdo con el método de evaluación el uso de dicha cantidad de energía equivale al consumo indirecto de agua de 3.35 m³. De forma similar, la deshidratación ácida consume gran cantidad de agua en forma indirecta (2.14 m³) debido al uso del 1-butanol como disolvente (Sindhu *et al.*, 2019).

El análisis de la huella de Agua por su degradación se realizó dado que la huella hídrica solo hace referencia al volumen total de agua utilizado, no contemplando el efecto nocivo en el agua (ver Tabla 33). Los impactos por degradación de agua indican que para la categoría Acidificación 1 L de biocombustible 2,5 DMF genera 0.11 kg SO₂- eq. La emisión de dicho contaminante primario se presenta por la combustión fósil que se da en el transporte de materia prima e insumos y en los procesos industriales, tales como la ruta petroquímica para la producción del solvente 1- butanol (Rodríguez *et al.*, 2018). Los agentes químicos ácidos se emiten a la atmosfera, trasladándose al suelo y mediante procesos de lixiviación y escurrimiento ingresan al agua provocando su degradación (Vázquez *et al.*, 2018). La producción de biodiesel de segunda generación presenta una mayor contribución de emisiones de SO₂ en la etapa de transformación debido a la producción y uso de metanol, generando H₂SO₄ en la atmosfera que luego se traslada a la superficie terrestre en forma de lluvia acida (Vidal *et al.*, 2017)

La categoría Eutrofización indica que 1 L de biocombustible 2,5 DMF genera 0.006 kg P-eq (ver Tabla 33). Este valor evidencia que tanto los procesos como los materiales empleados en el sistema desarrollado contribuyen en menor medida a la generación de efluentes con alta carga orgánica rica en nitrógeno y fosforo. El aporte más significativo ocurre en el proceso de deshidratación ácida

por el uso de compuestos orgánicos. La degradación de la materia orgánica restringe la disponibilidad de oxígeno y contamina con diversos compuestos los cuerpos de agua incrementando una gran diversidad de algas que causan la muerte de la fauna en el ambiente acuático (Saulino, 2011; Ji *et Al.*, 2019).

La categoría Ecotoxicidad muestra que 1 L de biocombustible 2,5 DMF genera 156.03 kg de 1,4-DCB por efecto del transporte de la biomasa residual, fabricación de vehículos utilizados y consumo de energía en la producción del solvente 1-butanol (ver Tabla 33). En relación al ciclo de vida del biodiésel, las etapas de cultivo y extracción de aceite contribuyen en mayor medida a la categoría ecotoxicidad por el uso de fertilizantes, pesticidas y otros agentes químicos. A diferencia del cultivo de cabuya (*Agave americana L.*) que presenta cierta ventaja, porque se realiza sin utilizar fertilizantes y plaguicidas químicos que afectan al ambiente a corto, mediano o largo plazo (Rodríguez *et al.*, 2018).

La categoría Toxicidad humana indica que 1 L de biocombustible 2,5 DMF produce 31.98 kg de 1,4-DCB, valor generado principalmente por el impacto debido a la fabricación del medio de transporte de la biomasa residual y el consumo de energía en la producción del solvente 1- butanol (ver Tabla 33). Los impactos ambientales de esta categoría en la salud humana por efecto del 2,5 DMF están generando mucho interés por tratarse de un compuesto derivado furánico, los estudios realizados en la Universidad de Birmingham (Inglaterra) sobre la toxicidad relativa y mutagenicidad del 2,5 DMF concluyen que no es genotóxico y la toxicidad de los productos intermedios de combustión son de mayor riesgo que las emitidas por el 2,5 DMF (Hongming y Chongming, 2016).

5. Análisis de impactos por método Demanda de Energía Acumulada

El resultado del consumo neto de energía fósil para la producción de 1 L de biocombustible 2,5 DMF fue 665 MJ (ver Tabla 34). El mayor consumo se presenta en la etapa de deshidratación ácida por la producción del solvente 1-butanol (1.92×10^3 MJ). Dicho compuesto es un alcohol primario, obtenido mediante una ruta petroquímica económicamente competitiva, pero con un alto requerimiento de energía fósil (Morelos, 2016). El valor neto de la energía usada por el sistema resulta menor que la energía consumida en el proceso más crítico cuando se recircula al sistema el solvente 1-butanol, lo cual disminuye el uso y el consumo energético. El uso de rutas de producción selectivas del 2,5 DMF a partir de 5-HMF utilizando alcoholes secundarios como fuente de hidrogenación, tales como la Hidrogenación Catalítica por Transferencia (CTH) facilita que el H₂ pueda ser transferido fácilmente de los alcoholes secundarios para producir 2,5 DMF, viabilizando un proceso eficiente y sostenible sin utilizar derivados del petróleo (Jae *et al.*, 2013; Barrientos *et al.*, 2019).

6. Variabilidad de impactos ambientales bajo el sistema desarrollado

Los resultados de la variabilidad respecto a las emisiones netas, degradación del agua y consumo de energía fósil, reflejan un aumento progresivo de los impactos en todas las categorías evaluadas debido al incremento de insumos, energía fósil y consumo de agua al aumentar la producción del biocombustible 2,5 DMF (ver Tabla 35). La insolubilidad del 2,5 DMF en agua respecto al etanol, representa una ventaja dado que se genera menor contaminación en dicho medio durante

el transporte y almacenamiento, además requiere una menor energía en la etapa de destilación (Hongming y Chongming, 2016).

7. Variabilidad y comparación de los impactos ambientales en los escenarios evaluados

El resultado de las emisiones totales generadas en el EP N° 1 indica que 1 L de biocombustible 2,5 DMF genera 149.64 kg CO₂-eq (ver Tabla 38). La emisión neta de CO₂ refleja una gran reducción respecto al resultado obtenido bajo el sistema desarrollado (ver Figura 12). La disminución de las emisiones de CO₂ se presenta por la influencia en el cambio del modo de transporte de la materia prima, adquisición de insumos en el mercado local y la sustitución de la hidrólisis enzimática por la hidrólisis térmica, constituyendo el EP N° 1 un escenario eficiente y sostenible ambientalmente para la producción de 2,5 DMF. En el caso de la producción de biodiesel de segunda generación, las mayores emisiones de GEI se presentan por el uso de combustible fósil, NaOH y metanol, indicando que las emisiones no corresponden exclusivamente al proceso de producción de biodiésel sino también a la fabricación de los insumos utilizados en los procesos que poseen una carga ambiental propia (Vidal *et al.*, 2016).

El resultado de evaluar los impactos por degradación del agua en el EP N° 2 indican que 1 L de biocombustible 2,5 DMF genera en las categorías: Eutrofización 0.026 kg P-eq, Acidificación 0.287 kg SO₂-eq, Ecotoxicidad 158.271 kg 1,4 DCB, Toxicidad humana 66.44 kg 1,4 DCB y consumo de agua 6.56 m³ (ver Tabla 38). Los valores obtenidos reflejan un incremento respecto a los valores netos calculados en el escenario desarrollado (ver Figura 13). El impacto se justifica en el EP N° 2 porque se ha evaluado sin considerar ningún tipo de recirculación en el sistema y al aplicar el software de cálculo, este asume

como residuos los materiales no recuperados y además se incrementa la cantidad de insumos a medida que aumenta la producción del biocombustible 2,5 DMF. Por los resultados obtenidos el EP N° 2 representa un escenario negativo para la producción de 2,5 DMF, pasando a ser esencial la recirculación de materiales para reducir la generación de residuos del sistema y la cantidad de insumos empleados. Para disminuir los impactos por degradación del agua es fundamental atender el aspecto de generación y tratamiento de efluentes líquidos e implementar tecnologías para la recuperación de los residuos orgánicos, puesto que la producción de biocombustibles emplea agua en distintas etapas y en cada una genera efluentes líquidos que de no ser tratados adecuadamente pueden contribuir a la contaminación de los cuerpos receptores (Saulino, 2011; Falabella, 2018).

El resultado neto del consumo de energía fósil en el EP N° 3 para producir 1 L de biocombustible 2,5 DMF es 87.18 MJ (ver Tabla 38), demostrando que en dicho tratamiento se ha logrado reducir el consumo de energía fósil respecto al valor obtenido en el sistema desarrollado (ver Figura 14). El menor consumo energético en el EP N° 3 se consiguió promoviendo el cambio en el transporte de la materia prima, adquisición de insumos en el mercado local y generación de energía por combustión del bagazo de Cabuya (*Agave americana* L.), logrando un escenario sostenible ambientalmente para la producción del biocombustible 2,5 DMF (Carvalho *et al.*, 2016).

VII. CONCLUSIONES

Considerando los resultados alcanzados y los objetivos propuestos para la presente investigación, se formulan las siguientes conclusiones:

La Cabuya (*Agave americana* L.) brinda un efecto positivo en la conservación del suelo, además con el extracto de esta planta se produce miel y por fermentación se obtienen bebidas alcohólicas de amplio consumo a nivel mundial, dichas aplicaciones generan gran cantidad de biomasa residual que pueden ser utilizados como materia prima secundaria para la producción de biocombustibles, realizando de esta manera un uso integral de la planta.

Durante el ciclo de vida del 2,5 DMF bajo el sistema desarrollado, se generaron impactos ambientales en aire (2.44×10^5 kg CO₂-eq), agua (consumo = 4.55 m³, Acidificación = 0.11 kg SO₂-eq, Eutrofización = 0.01 kg P-eq, Ecotoxicidad = 156.03 kg 1,4 DCB, Toxicidad humana = 31.98 kg 1,4 DCB) y consumo de energía Fósil (665 MJ), evidenciando un mayor efecto negativo en las categorías: Calentamiento Global, Consumo de Agua, Ecotoxicidad, Toxicidad Humana y Consumo de Energía Fósil, debido principalmente al uso de combustibles no renovables en la generación y transporte de insumos.

El impacto ambiental generado bajo los escenarios EP N° 1 (149.64 kg CO₂-eq) y EP N° 3 (87.18 MJ) son menores a los obtenidos bajo el sistema desarrollado, siendo favorable la sustitución de los procesos críticos identificados, mientras que los impactos producidos bajo el escenario EP N° 2 fueron mayores (consumo = 6.56 m³, Acidificación = 0.29 kg SO₂-eq, Eutrofización = 0.03 kg P-eq, Ecotoxicidad = 164.75 kg 1,4 DCB y Toxicidad Humana = 66.44 kg 1,4 DCB) respecto al sistema desarrollado, debido a que dicho escenario no contempló la recirculación de materiales.

Los escenarios EP N° 1 y EP N° 3 poseen mayor sostenibilidad ambiental para la producción del biocombustible 2,5 DMF, dado que se genera menor cantidad

de emisiones de GEI y menor consumo de energía fósil respectivamente. A diferencia del escenario EP N° 2 que posee menor sostenibilidad ambiental por generar mayores impactos en el agua.

El ACV del biocombustible 2,5 DMF ha permitido determinar los impactos ambientales negativos considerando todas las etapas (extracción de biomasa residual, transporte, conversión de biomasa y uso) de su producción e identificando los procesos críticos (transporte de insumos importados, deshidratación acida e hidrogenólisis), para mejorarlos mediante escenarios alternativos que permitan obtener sistemas productivos más eficientes y sostenibles ambientalmente.

VIII. RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar investigando sobre nuevas fuentes de materia prima para la producción de biocombustibles, especialmente biomasa residual (residuos municipales, agrícolas e industriales).

Se recomienda continuar la búsqueda de nuevas y mejores rutas de producción, sostenibles y con enfoque de economía circular, de esta manera se podría reducir los impactos al ambiente y ampliar el mercado de biocombustibles en un futuro próximo.

Se recomienda tener actualizado el registro de terrenos que existen en el Perú, especialmente aquellos eriazos o zonas áridas y semiáridas, a fin de promover su uso para el cultivo de Cabuya (*Agave americana* L.); puesto que, se ha comprobado que esta planta puede crecer sin problemas en estos tipos de suelo, además de contribuir a la fertilidad y conservación del mismo, en beneficio de los agricultores de las zonas correspondientes.

Se recomienda complementar los resultados del análisis de impacto ambiental realizado, con estudios de impacto social y económico, con la finalidad de que los resultados sean considerados en la propuesta de políticas integrales que promuevan el desarrollo sostenible.

Finalmente, se recomienda promover el uso del ACV como herramienta de evaluación de impactos ambientales, a fin de conocer la viabilidad ambiental de productos o servicios que se pretendan producir o desarrollar a futuro.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, A. (2012). *Biocombustibles*. Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/ucsursp/detail.action?docID=3212491>
- Agencia Europea del Medio Ambiente EEA. (2019). Guía de Inventario de Emisiones de Contaminantes del aire 2019/ Sector Energía/ Combustión/ Hoja de cálculo emisiones aviación. Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación. Recuperado de <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-a-aviation-1/view>
- Agencia Europea del Medio Ambiente EEA. (2019). Guía de Inventario de Emisiones de Contaminantes del aire 2019/ Sector Energía/ Combustión/ Transporte por carretera. Programa Europeo de Monitoreo y Evaluación. Recuperado de <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i/view>
- Alejos, C., y Calvo, E. (2015). Biocombustibles de primera generación. *Revista Peruana de Ingeniería Química*, 18(2), 19–30. Recuperado de <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/quim/article/view/11784/10542>
- Alexandrino, K., Millera, A., Bilbao, R., Alzueta, M. (2017). Conversión de 2-metilfurano en condiciones de combustión. Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A, 4, 33-34. Recuperado de <https://papiro.unizar.es/ojs/index.php/jji3a/article/view/1606>

- Arvesen, A., Cherubini, F., Del Alamo, G., Astrup, R., Becidan, M., Belbo, H., y Stromman, A. (2018). Cooling aerosols and changes in albedo counteract warming from CO₂ and black carbon from forest bioenergy in Norway. *Scientific Reports*, 8(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21559-8>
- Barrientos, G., León, E., Ramón, H., Talavera, O., Sampedro, M., Hernández, E. (2019). Caracterización morfológica de *Agave angustifolia* y su conversión en Guerrero, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. (10)3, 655-668. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.1554>
- Carvalho, M., Da Silva, V., Gama, V., Alburquerque, N. y Moreira, L. (2019). Carbon footprint of the generation of bioelectricity from sugarcane bagasse in a sugar and ethanol industry. *Global Warming*. 17 (3) 235-251. DOI: 10.1504/IJGW.2019.098495
- Cervantes, L., y Inga, C. (2015). *Elaboración de miel del cabuya y estudio de prefactibilidad de una planta en el distrito de Huanca Huanca, Provincia de Angaraes, Departamento De Huancavelica*. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Ciroth, A., Muller, S., Weidema, B. (2016). Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent. *International Journal of Life Cycle Assessment* 21, 1338–1348. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0670-5>
- Civit, B., Arena, A., Piastrellini, R., Curadelli, S. y Silva, J. (2011). Comparación entre la huella hídrica de biodiesel obtenido a partir de aceite de colza y aceite de soja. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. (15). Recuperado de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/101853>
- Criollo, O. (2011). Establecimiento de un protocolo para la propagación masiva in vitro de Cabuya Azul (*Agave americana* L.) y Cabuya Blanca (*Furcraea*

- andina Trel.). Escuela Politécnica del Ejército (Tesis de Grado).
- Davis, S., Kuzmick, E., Niechayev, N., Hunsaker, D. (2017). Productivity and water use efficiency of agave americana in the first field trial as bioenergy feedstock on arid lands. *Bioenergy*, (9), 314-325. DOI: 10.1111/gcbb.12324
- Corona, B. (2016). Análisis de Sostenibilidad del ciclo de vida de una configuración innovadora de tecnología termo solar. (Tesis Doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.43813>.
- De La Torre, N., Ruiz, M., Rincón, C., Rodríguez, M., Arias, C., Gutiérrez, F., y Rincón, R. (2016). Effect of plant growth-promoting bacteria on the growth and fructan production of *Agave americana* L. *Brazilian Journal of Microbiology*, 47(3), 587–596. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.04.010>
- Falabella, C., Garro, J., Korb, M., Minaglia, M., Tuninetti, L. (2018). Evaluación de la huella de agua, caso de estudio: quesos de pasta semidura. *Instituto Nacional de Tecnología Industrial*. Recuperado de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjvbdCYhbTqAhXCLLkGHUUyB90QFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.inti.gob.ar%2Fpublicaciones%2Fdescargac%2F507&usg=AOvVaw2dWMxYUTyky5ngM_i7DERb
- Ferrari, L. (2013). Energías fósiles : diagnóstico , perspectivas e implicaciones económicas, 59(10), 36–43. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/570/57030971005.pdf>
- Garcia, E., Romero, A. y Nobel, P. (2011). Highlights for Agave Productivity. *GCB Bioenergy*, (3), 4-14. DOI: 10.1111/j.1757-1707.2010.01078.x
- Giraldo, D. (2017). Una nueva especie de Agave (Asparagaceae) de Colombia y una clave taxonómica para las especies sudamericanas. *Caldasia*, 39(1),

33-49. DOI:<https://doi.org/10.15446/caldasia.v39n1.63318>

González, E., y Castro, E. (2013). *Aspectos técnico-económicos de los estudios previos inversionistas para la producción de etanol de caña de azúcar.*

Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/ucsursp/detail.action?docID=3216319>

Guevara, C. y Vallejo E. (2014). Potencialidades medicinales de los géneros *Frucaea* y *Agave*. *Rev. Cubana de Plantas Medicinales*, 19(1) 248-263.

Recuperado de <http://scielo.sld.cu/pdf/pla/v19n3/pla12314.pdf>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2019).

Enmiendas 2019 a las Directrices del IPCC del 2006 para Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero. Recuperado de [https://www.ipcc-](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/2_Volume2/19R_V2_0_Cover.pdf)

[nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/2_Volume2/19R_V2_0_Cover.pdf](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/2_Volume2/19R_V2_0_Cover.pdf)

Hackenberg, N. (2014). Biocombustibles de segunda generación. *Revista*

Redesma 4, 1–8. Recuperado de <http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rvr/v2n2/a05.pdf>

Hallgren, W., Schlosser, C., Monier, E., Kicklighter, D., Sokolov, A., y Melillo, J.

(2013). Climate impacts of a large-scale biofuels expansion. *Geophysical Research Letters*, 40(8), 1624–1630. <https://doi.org/10.1002/grl.50352>

Hongming, X. y Chongming, W. (2016). A Comprehensive Review of 2,5-

Dimethylfuran as a Biofuel Candidate. *Innovations beyond Bioethanol*. 105-129. DOI: 10.1002/9783527685318.ch5

Jae, J., Zheng, W., Lobo, R. v Vlachos, D. (2013). Production of Dimethylfuran

from Hydroxymethylfurfural through Catalytic Transfer Hydrogenation with Ruthenium Supported on Carbon. *Chem Sus Chem*. (6), 1158-1162. DOI:

10.1002/cssc.201300288

Ji, K., Shen, C., Yin, J., Feng, X., Lei, Hao., Yuqing, C., Cai, N., Tan, T. (2019).

Highly Selective Production of 2,5- Dimethylfuran from fructose through Tailoring of Catalyst Wettability. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58, 10844-10854. DOI: 10.1021/acs.iecr.9b01522

Kazi, F., Patel, A., Serrano, J., Dumesic, J., Anex, R. (2011). Análisis Tecn-

económico para la producción de Dimetilfurano (DMF) e Hidroximetilfurfural (HMF) a partir de fructosa pura en procesos catalíticos. *Chemical Engineering Journal*, 169, 329-338.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.03.018>

Kaushik, N., y Singh, S. (2016). Opportunities for Bio Fuels - Indian Scenario.

Procedia Environmental Sciences, 35, 847–852.

<https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.101>

Langholtz, M., Webb, E., Preston, L., Turhollow, A., Breuer, N., Eaton, L., y

Downing, M. (2014). Climate risk management for the U.S. cellulosic biofuels supply chain. *Climate Risk Management*, 3, 96–115.

<https://doi.org/10.1016/j.crm.2014.05.001>

Leshkov, Y. Barrett, C. Liu, Z. y Dumesic, J. (2007). Production of Dimethylfuran

for liquid fuels from biomass-derived carbohydrates. *Nature* 447, 982–985. <https://doi.org/10.1038/nature05923>

Lozano, G. (2012). Estudio de pre-factibilidad para la producción de 2,5-DMF como biocomponente energético renovable y limpio para mejorar el octanaje de los biocombustibles de Refinería Talara – PETROPERÚ S.A. *Revista del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM*, 15(29), 61–68.

Recuperado de

revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/viewFile/2205/1916

Lozano, A. (2014). Análisis del Ciclo de Vida como instrumentos de desarrollo de la ecología industrial: aplicación al proceso de impresión de un periódico. (Tesis Doctoral). Universidad de las Palmas de Gran Canaria. España. Recuperado de <https://accedacris.ulpgc.es/handle/10553/12992>

Machado, C. (2010). Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe. *Organización Latinoamericana de Energía*, 88. Recuperado de <http://www.bivica.org/upload/biocombustibles-situacion.pdf>

McMurray, A., Pearson, T., y Cassarin, F. (2017). Guía para aplicar el enfoque de Monte Carlo al análisis de incertidumbre en la contabilidad forestal y de gases de efecto invernadero. Winrock International. Recuperado de https://winrock.org/wp-content/uploads/2018/02/Informe_incertidumbre-12.26.17-ES.pdf

Ministerio de Energía y Minas. (2016). *Balance Nacional de Energía 2016*. Recuperado de http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/BNE_2016.pdf

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2020). Reporte Anual de Gases de Efecto Invernadero del sector Energía 2016, categoría: Combustion móvil. *INFOCARBONO*. Recuperado de http://infocarbono.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/09/RAGEI_COMBUSTION-MOVIL_VERSION-FINAL.pdf

Monforti, F., Lugato, E., Motola, V., Bodis, K., Scarlat, N., y Dallemand, J. (2015). Optimal energy use of agricultural crop residues preserving soil organic carbon stocks in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,

44, 519–529. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.033>

Montañez, J., Venegas, J., Vivar, M., y Ramos, E. (2011). Extracción, caracterización y cuantificación de los fructanos contenidos en la cabeza y en las hojas del Agave tequilana Weber azul. *Bioagro*, 23(3), 199–206. Recuperado de [http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev23\(3\)/7.%20Extracci%C3%B3n,%20caracterizaci%C3%B3n%20y%20cuantificaci%C3%B3n%20de%20fructanos.pdf](http://www.ucla.edu.ve/bioagro/Rev23(3)/7.%20Extracci%C3%B3n,%20caracterizaci%C3%B3n%20y%20cuantificaci%C3%B3n%20de%20fructanos.pdf)

Morelos, J. (2016). Análisis de la variación de la eficiencia en la producción de biocombustibles en América Latina. *Estudios Generales*, (32), 120-126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.estger.2016.01.001>

Muller, S., Lesage, P., Citroth, A., Mutel, C., Weidema, B. P., & Samson, R. (2014). *The application of the pedigree approach to the distributions foreseen in ecoinvent v3. The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1327–1337. doi:10.1007/s11367-014-0759-5

Muth, J., Bryden, M., y Nelson, G. (2013). Sustainable agricultural residue removal for bioenergy: A spatially comprehensive US national assessment. *Applied Energy*, 102, 403–417. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.028>

Nogués, S., García, D., y Rezeau, A. (2010). *Energía de la biomasa*. Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/ucsursp/detail.action?docID=5214090>

Norma Técnica Peruana ISO 14040:2017. Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y Marco de Referencia. *Instituto Nacional de Calidad*. Recuperado de <https://salallecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/datos.aspx?id=24965>

- Norma Técnica Peruana ISO 14044:2019 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Requisitos y directrices. *Instituto Nacional de Calidad*. Recuperado de <https://salalecturavirtual.inacal.gob.pe:8098/datos.aspx?id=31517>
- Organización Meteorológica Mundial. (2017). *WMO Greenhouse Gas Bulletin* (No. 13). Recuperado de https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4022
- Pérez, J. (2016). *Biocombustibles*. Recuperado de <http://ebookcentral.proquest.com/lib/ucsursp/detail.action?docID=4870617>
- Phuong, J., Kim, S., Thomas, R. y Zhang, L. (2012). Predicción de toxicidad del candidato a biocombustible 2,5 Dimetilfurano en el Ambiente y Sistemas Biológicos. *Mutagénesis Ambiental y Molecular*. 53. 478-87. DOI 10.1002/em.21702. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/228064101_Predicted_toxicity_of_the_biofuel_candidate_25-dimethylfuran_in_environmental_and_biological_systems
- Pineda, E., Uribarri, D. (2014). Propiedades químicas y creencias curativas populares del Maguey o Cabuya (*Agave americana* L.) Caso Churcampa, Huancavelica. *Ciencia y Desarrollo* 17(1). <http://dx.doi.org/10.21503/CienciayDesarrollo.2014.v17i1.09>
- Qian, Y., Zhu, L., Wang, Y. y Lu, X. (2015). Recent progress in the development of biofuel 2,5- DMF. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (41) 633-646. DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.085>
- Ramos, F., Diaz, M., Villar, M. (2016). Biocombustibles. Plan piloto de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur-Conicet. Vol. 25 (69-73).

Recuperado de
https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/25791/CONICET_Digital_Nro.cf291889-a370-4b7a-915b-4de3e1058c97_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Ritchie, D., Guohong, T., Hongming, X., Mirosław, L., Xuesong, W. y Zouhua, H. (2011). Effect of spark timing load on a DISI engine fuelled with 2,5-dimethylfuran. *Fuel*, 90(2011), 449-458, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.10.008>

Rivera, R. (2016). Aporte del Agave americana a los servicios ecosistémicos en la comunidad campesina de Joras-Ayabaca-Piura; Perú. Tesis de Mestría. Universidad Nacional Agraria La Molina. Peru <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26969.72807>

Rodríguez, J., García, C., Zafra, C. (2016). El Análisis del Ciclo de Vida aplicado a las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Ciencia y Sociedad*, 41(3), 617-636. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87048049007>

Rodríguez, J., Ordoñez, L., Orozco, I., Torres, J. (2018). Análisis del Ciclo de Vida para la producción de Biodiesel derivado de palma de aceite, caso colombiano. *Publicaciones e Investigaciones*. 13(1), 11-24. <https://doi.org/10.22490/25394088.3262>

Rulli, C., Bellomi, D., Cazzoli, A., De Carolis, G., y D'Odorico, P. (2016). The water land food nexus of first generation biofuels. *Scientific Reports*, 6(3), 1–10. <https://doi.org/10.1038/srep22521>

Shaohua, Z., Ritchie, D., Hongming, X., Jun, Z., Dale, T., Mirosław, L. y Paul, R. (2010). Combustion and Emissions of 2,5 Dimethylfuran in a Direct-Injection Spark-Ignition Engine. *Energy fuels*. (24), 2891-2899.

DOI:10.1021/ef901575a

- Sánchez, J., Cardona, A., y Sánchez, D. L. (2012). Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol: Una aproximación cualitativa. *Revista Universidad EAFIT*, 43(146), 59–79. <https://doi.org/0120-341X>
- Saulino, F. (2011). Implicancias del desarrollo de los biocombustibles para la gestión y el aprovechamiento del agua. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*. Recuperado de https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3941/1/S2011128_es.pdf
- Sindhu, R., Binod, P., Pandey, A., Ankaram, S., Duan, Y., y Awasthi, M. (2019). Biofuel Production From Biomass. *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, 79–92. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64083-3.00005-1>
- Sikarwar, V., Zhao, M., Fennell, P., Shah, N., y Anthony, J. (2017). Progress in biofuel production from gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 61, 189–248. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.04.001>
- Urteaga, P. (2017). Biocombustibles y agua, la transformación del espacio en Piura, Perú. *ANTHROPOLOGICA*. (38) 7-39. <https://doi.org/10.18800/anthropologica.201701.001>
- Vásquez, A., De la Cruz, R., y Coello, F. (2016). Los Biocombustibles: Desarrollos recientes y tendencias internacionales. Documento de Trabajo N° 36, Gerencia de Políticas y Análisis Económico-Osinergmin, Perú. Recuperado de http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Documentos_de_Trabajo/Documento-Trabajo-36.pdf

- Vázquez-Rowe I, Larrea-Gallegos G, Villanueva-Rey P, Gilardino A (2017) Climate change mitigation opportunities based on carbon footprint estimates of dietary patterns in Peru. *PLoS ONE* 12(11): e0188182. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188182>
- Vázquez-Rowe, I., Ziegler-Rodríguez, K., Laso, J., Quispe, I., Aldaco, R., Kahhat, R. (2018). Production of cement in Peru: Understanding carbon-related environmental impacts and their policy implications. *Resources, Conservation & Recycling*, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.12.017>
- Vidal, A., Quintero, J. y Herrera, I. (2017). Life cycle analysis of biodiésel production from used vegetal oil. *DYNA*. 84(201), 155-162. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n201.54469>
- Viñals, M, Bell, A, Michelena, G., y Ramil, M. (2012). Obtención de etanol a partir de biomasa lignocelulósica. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 46(1), 7-16. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223123848002>
- Xu, H., y Wang, C. (2016). Una revisión completa del 2,5 Dimetilfurano como candidato a biocombustible: Innovaciones más allá del bioetanol. *Biocombustibles de biomasa Lignocelulósica*. (pp. 105-129). <https://doi.org/10.1002/9783527685318.ch5>
- Zhang, D., Shen, J., Zhang, F., Li, Y., y Zhang, W. (2017). Carbon footprint of grain production in China. *Scientific Reports*, 7(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04182-x>

X. ABREVIATURAS

1. **ACV:** Análisis del Ciclo de Vida
2. **ARD:** Azúcares Reductores
3. **AEMA:** Agencia Europea de Medio Ambiente
4. **CO₂:** Dióxido de carbono
5. **CO:** Monóxido de carbono
6. **CG:** Calentamiento Global
7. **CH₄:** Metano
8. **CuRu/C:** Cobre rutenio en base de carbono
9. **DMF:** Dimetilfurano
10. **ETH:** Etanol
11. **EPA:** Agencia de Protección Ambiental
12. **FOS:** Fructooligosacáridos
13. **GEI:** Gases de Efecto Invernadero
14. **HMF:** Hidroximetilfurfural
15. **ISO:** Organización Internacional de Normalización
16. **IPCC:** Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
17. **INACAL:** Instituto Nacional de Calidad
18. **IMEP:** Presión específica media indicada
19. **KW-H:** Kilo watts –hora
20. **kg SO₂- eq:** Kilogramo de Dióxido de azufre equivalente
21. **kg Peq:** Kilogramo de fosforo equivalente
22. **kg 1,4-DCB:** kilogramo de 1,4 Diclorobenceno
23. **MIMEN:** Ministerio de Energía y Minas
24. **MJ:** Mega Joule
25. **M³:** metros cúbicos
26. **N₂O:** Óxido de Nitrógeno
27. **NO_x:** Óxidos de nitrógeno
28. **OMM:** Organización Meteorológica Mundial
29. **O₃:** Ozono
30. **RSD:** Desviación Estándar Relativa
31. **THC:** Hidrocarburos totales
32. **ULG:** Gasolina sin plomo
33. **UTM:** Universal Transversal Mercator
34. **UF:** Unidad Funcional

XI. ANEXOS

Anexo 1: Tomas fotográficas del procedimiento experimental



Planta de Cabuya (*Agave americana* L.) encontrada en el distrito de Huanca-Huanca, provincia de Angaraes, región Huancavelica.



Recolección de las hojas de Cabuya



Vista del corazón del cultivo de Cabuya



Preparación de la muestra vegetal para transporte



Toma de muestra de suelo zona 1



Toma de muestra de suelo zona 2



Vista del distrito de Huanca-Huanca



Zonas de cultivo de cabuya



Muestras vegetales empaquetadas para su traslado



Cortado de espinas y puntas de hojas



Equipos para el cocinado y prensado



Hoja de cabuya antes del cortado



Separación de la parte superior de la hoja



Cortado longitudinal de la parte inferior de la hoja



Cortado en trozos pequeños hojas de Cabuya



Cocción de los trozos de hojas de Cabuya



Prensado de muestra con extractor casero



Residuos del proceso de cortado y prensado (bagazo de Cabuya)



Filtrado del extracto de Cabuya empleando bomba de vacío



Extractos de Cabuya filtrado (derecho) y No filtrado (izquierdo)



Medición de pH en la muestra de extracto de cabuya puro



Extracto de Cabuya diluido en agua ultra pura



Enzima Inulinasa diluido en solución amortiguadora



Muestras de extracto de cabuya sometidas a hidrolisis enzimática



Comparación de prueba de fehling en muestra hidrolizada y en
Disolución de extracto puro



Mezcla de sal NaCl con solvente 1-butanol para
reacción de deshidratación ácida



Mezcla de disolución de fructosa con HCl y NaCl
para reacción de deshidratación ácida



Bomba de vacío utilizada como reactor para deshidratación acida



Reactor envuelto en papel filtro para concentrar el calor



Vista interior de la bomba de vacío



Vista de fase orgánica y fase acuosa en muestra después de haber sido sometida a deshidratación ácida



Separación de fases luego de la deshidratación ácida



Separación de fases orgánica y acuosa empleando embudo de decantación



Filtración de muestra deshidratada



Mezcla de sulfito de sodio anhidro (agente químico deshidratante) en muestra de fase orgánica



Formación de fase acuosa en el lado inferior de la muestra de fase orgánica



Decantación de fase acuosa residual formada en muestra de fase orgánica

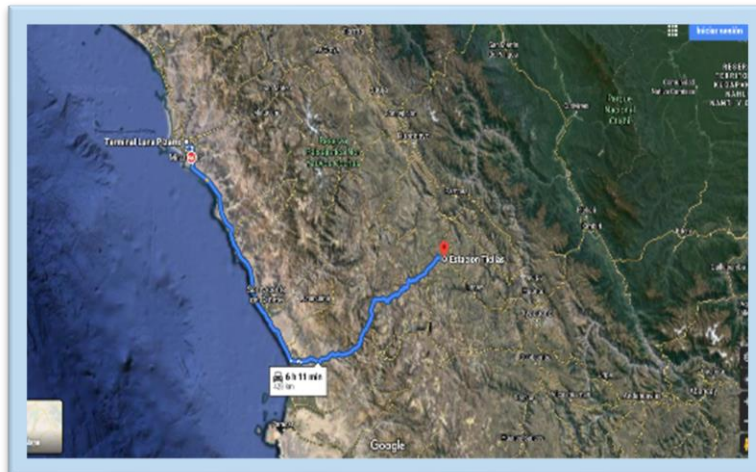


Vista de fase acuosa residual formada

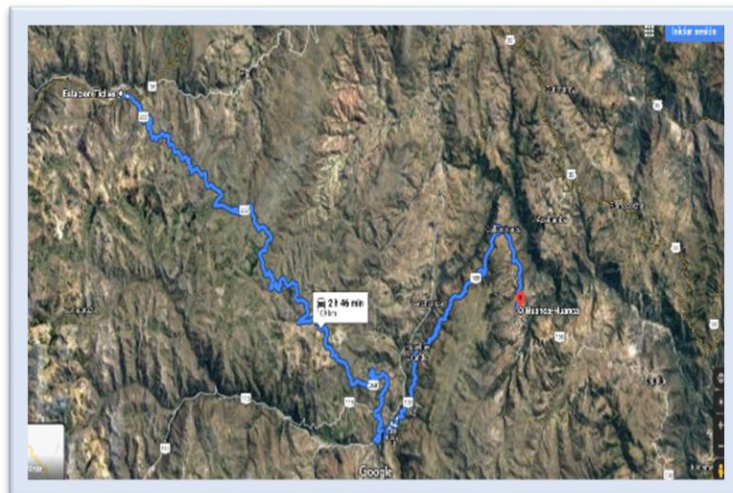


Prueba con reactivo 1-naftol realizada a muestra deshidratada (formación de anillo furánico-lado derecho) y disolución de extracto de cabuya

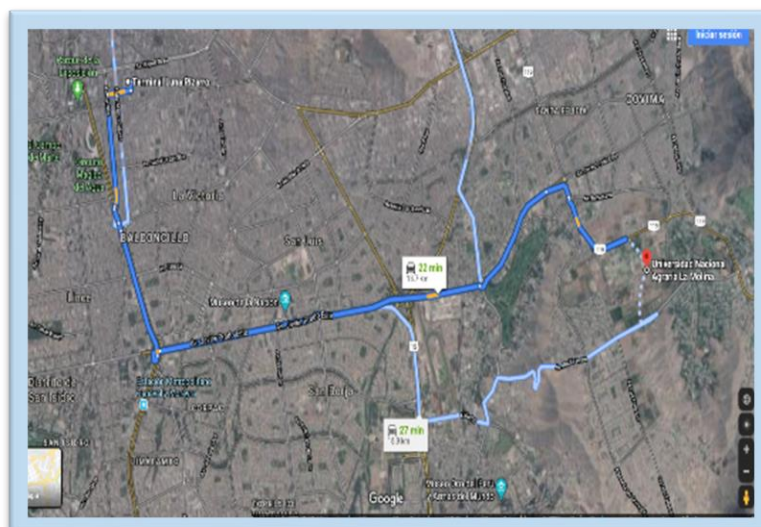
Anexo 2. Traslado de la biomasa residual



Distancia total recorrida primer tramo. Fuente: Google- maps

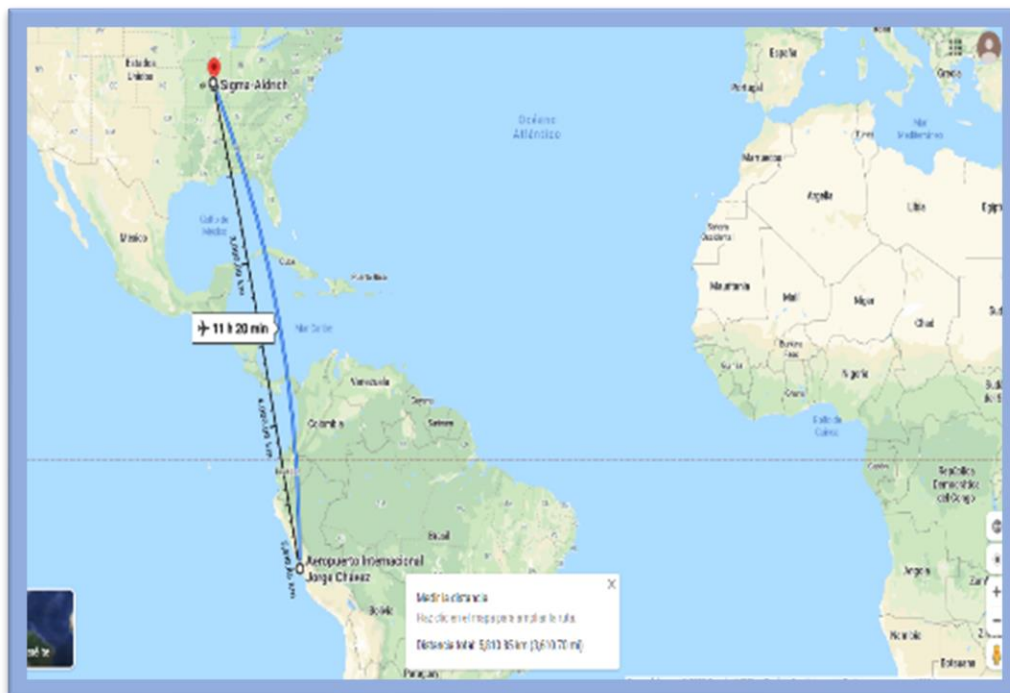


Distancia total recorrida segundo tramo. Fuente: Google- maps

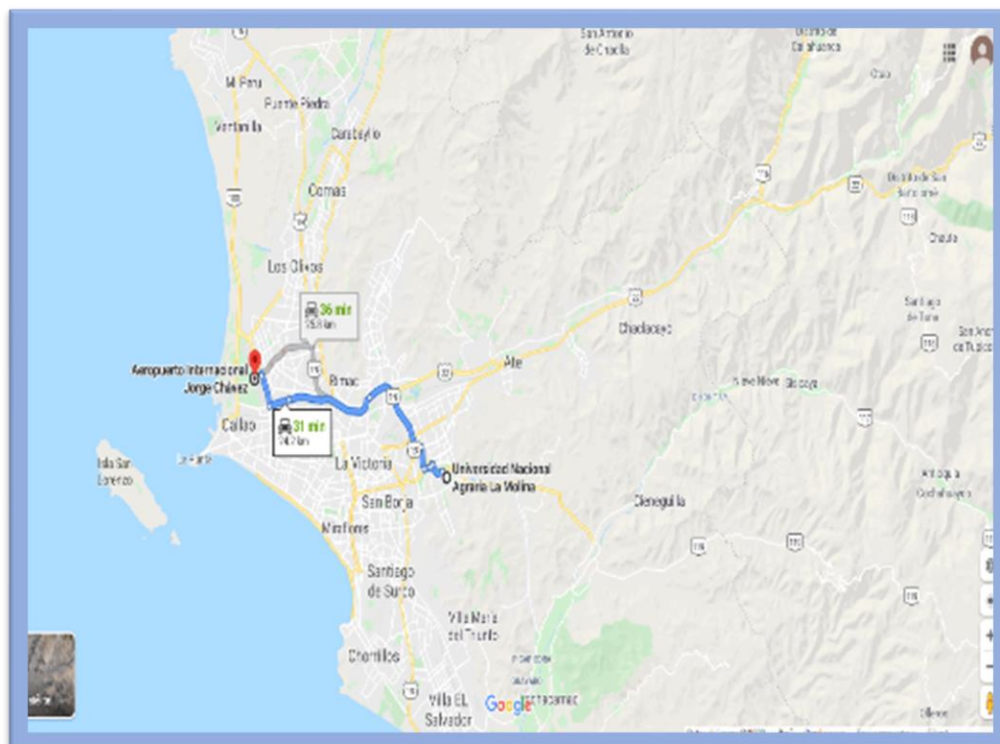


Distancia total recorrida tercer tramo. Fuente: Google- maps

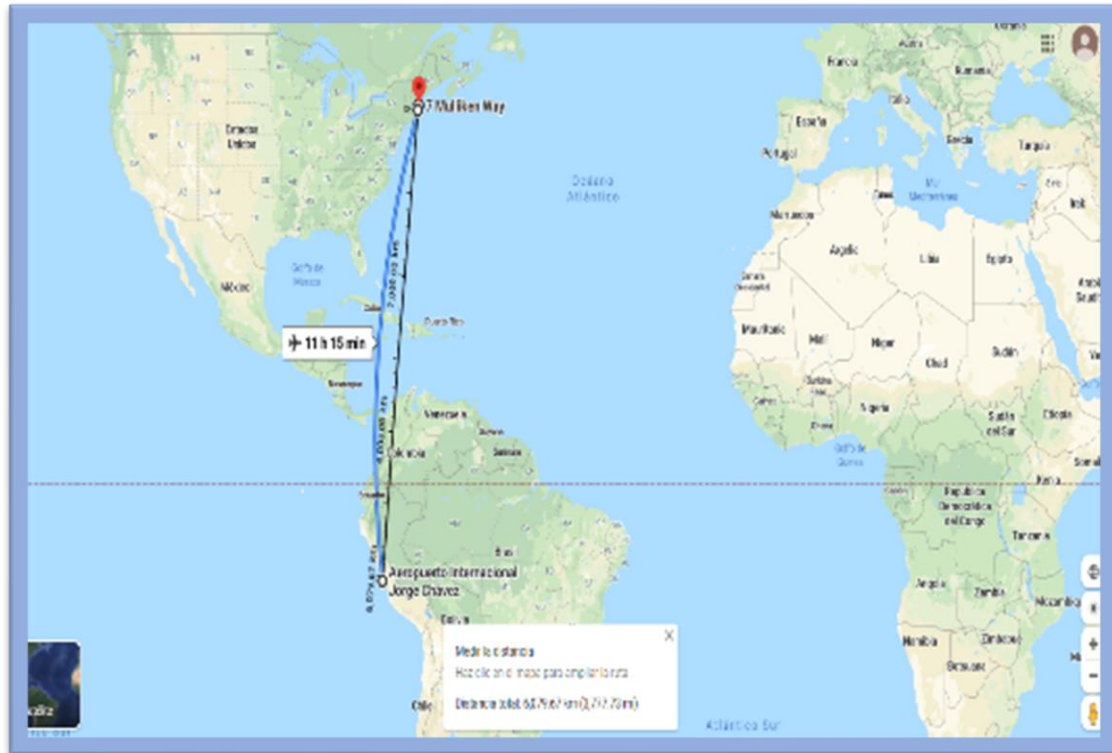
Anexo 3. Transporte de insumos importados



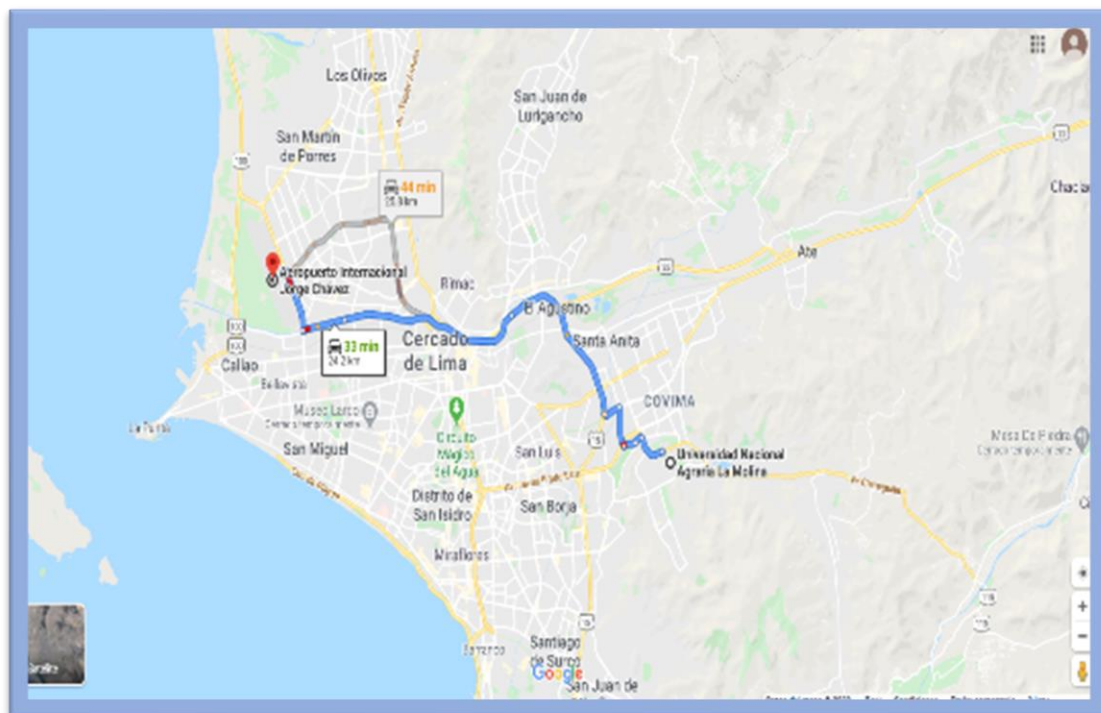
Transporte aéreo de enzima Inulinasa de *Asperligus Niger*. Fuente: Google-maps



Transporte terrestre de enzima Inulinasa de *Asperligus Niger*. Fuente: Google-maps.



Transporte aéreo de catalizador Ru/C. Fuente: Google-maps.



Transporte terrestre de catalizador Ru/C. Fuente: Google-maps.

Anexo 4. Constancia N° 298-USM-2019 del Museo de Historia Natural



"Año de la lucha contra la corrupción y la impunidad"

CONSTANCIA N° 298-USM-2019

LA (e) JEFE DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM) DEL MUSEO DE HISTORIA NATURAL, DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS, DEJA CONSTANCIA QUE:

La muestra vegetal (hoja y fruto), recibida de **Lizbet Márquez Roca**; estudiante de la Universidad Científica del Sur; ha sido estudiada y clasificada como: **Agave americana L.**, y tiene la siguiente posición taxonómica, según el Sistema de Clasificación de Cronquist (1981):

- DIVISION: MAGNOLIOPHYTA**
- CLASE: LILIOPSIDA**
- SUB CLASE: LILIIDAE**
- ORDEN: LILIALES**
- FAMILIA: AGAVACEAE**
- GENERO: Agave**
- ESPECIE: Agave americana L.**

Nombre vulgar: "Cabuya"
Determinado por: Mag. Hamilton Beltrán Santiago

Se extiende la presente constancia a solicitud de la parte interesada, para los fines que estime conveniente.

Lima, 12 setiembre de 2019


 **Dra. Joaquina Albán Castillo**
JEFE (e) DEL HERBARIO SAN MARCOS (USM)

JAC/ddb

Anexo 5. Informe de Ensayo N° 1-08129/19 Análisis calidad de suelos zona 1



AREQUIPA
Calle Fomento Rodríguez N° 1415
Malleros - Arequipa
T. (054) 265572

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Peña - Callao
T. (011) 519 9000
info@cerper.com - www.cerper.com

PIURA
Urb. Angamos A - 2 - Piura
T. (073) 322 908 / 3975 03161

INFORME DE ENSAYO N° 1-08129/19

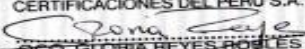
Solicitante	Manquez Roca, Lizbet	Identificación	M1-Cabuya
Domicilio	Av. Coricancha 288 Urb. Tahuantinsuyo-Independencia, Lima	Ubicación	12°51'42.38" Sur
Fecha de recepción	2019-09-02	Fecha de muestreo	2019-05-31
Fecha de inicio del ensayo	2019-09-03	Fecha de término del ensayo	2019-09-10
Identificado con HIS	1900987E (EXAG-14066-2019)	Ensayo realizado en	Laboratorio Ambiental

SUELO

MUESTRA	pH	C.E (dism.) (*)	P Disponible mg/kg	n Disponible mg/kg	ANÁLISIS TEXTURAL			CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO meq/100g					M.O. %		ELEMENTOS DISPONIBLES mg/kg										
					% ARENA	% LIMO	% ARCILLA	CLASE TEXTURAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	SUMA DE CATIONES	C.I.C.	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SD4 ⁺⁺	B	Cu	Fe	Mn	Zn		
M1-Cabuya	7.27	1.00	8.45	272.00	58	28	14	Franco Arenoso	12.17	2.76	0.68	0.29	-0.01	15.60	15.80	4.62	6.00	5350.00	604.20	7.41	1.62	5.08	25.40	29.90	16.73

(*) Ponto Saturada

Metodología:
pH: Comisión de Normalización y Acreditación Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Método 3.1 Rev. 2004. 3 pH 3.1 Suspensión y determinación potenciométrica.
Conductividad Eléctrica: Comisión de Normalización y Acreditación Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Método 9.1 Rev. 2004. 9 Conductividad Eléctrica 9.1 Extracto de saturación y determinación por conductimetría.
P Disponible: NOM 021-RECNAT-2000. Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis. 7.1.11. Fósforo extractible en suelos ácidos a neutros.
K Disponible: Comisión de Normalización y Acreditación Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Método 4.1 Rev. 2004. 4 Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio 4.1 Extracción con solución de acetato de amonio 1 mol/L a pH y determinación por espectrofotometría de absorción y emisión atómica. Con La.
Textura: NOM 021-RECNAT-2000 sección 7.1.9 Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis.
C.I.C: NOM 021-RECNAT-2000 sección 7.3.20 Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis.
Materia Orgánica: NOM 021-RECNAT-2000 sección 7.1.7 Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis.
Carbonato de Calcio: NOM 021-RECNAT-2000 sección 7.3.25 Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis.
Boro: NOM 021-RECNAT-2000 Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis 7.1.15. Determinación del contenido de boro.
Cobre, Hierro, Manganeso, Zinc: Comisión de Normalización y Acreditación Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Método 4.1 Rev. 2004. 4 Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio 4.1 Extracción con solución de acetato de amonio 1 mol/L a pH y determinación por espectrofotometría de absorción y emisión atómica. Con La.
Calcio: Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Comisión de Normalización y Acreditación. Sección 4.1 2004.
Magnesio: NOM 021-RECNAT-2000 sección 7.1.12 Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis.
Sulfato: Comisión de Normalización y Acreditación Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo 2004. Métodos de análisis recomendados para suelos chilenos. 6 Azufre 6.1 Extracción con solución de dióxido de hidrógeno fosfato de calcio 0.01 mol/L y determinación turbidimétrica.

CERTIFICACIONES DEL PERÚ S.A.

 SOLEDAD REYES MORALES
 SUBGERENTE DE LABORATORIOS

“EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE”

Anexo 6. Informe de Ensayo N° 1-08130/19 Análisis calidad de suelos zona 2



AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000
info@cerper.com - www.cerper.com

PURIA
Urb. Anáhuas A-2 - Puria
T. (073) 322 908 / 9975 63161

INFORME DE ENSAYO N° 1-08130/19

Solicitante	Marquez Roca, Lizbet	Identificación	M2-Cultivos Locales
Domicilio	Av. Concincha 295 Urb. Tahuantinsuyo-Independencia, Lima	Ubicación	74°37'34.10" Oeste
Fecha de recepción	2019-09-02	Fecha de muestreo	2019-08-31
Fecha de inicio del ensayo	2019-09-03	Fecha de término del ensayo	2019-09-10
Identificado con H/S	19009878 (EXAG-14066-2019)	Ensayo realizado en	Laboratorio Ambiental

SUELO

MUESTRA	pH	C.E (determ. T)	P Disponible mg/kg	K Disponible mg/kg	ANÁLISIS TEXTURAL				CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO meq/100g					ELEMENTOS DISPONIBLES mg/kg											
					% ARENA	% LIMO	% ARCILLA	CLASE TEXTURAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ⁺⁺⁺	SUMA DE CATIONES	C.I.C.	M.O. %	CO ₂ Ce %	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁼⁼	B	Cu	Fe	Mn	Zn
M2-Cultivos Locales	7.45	0.54	1.45	256.70	50	30	20	Franco	14.43	4.14	0.73	0.30	+0.01	19.60	19.60	1.77	5.19	6805.00	695.80	4.94	1.20	4.23	10.50	7.93	4.47

(*) Pesta saturada

Metodología:
pH: Comisión de Normalización y Acreditación Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Metodo 3.1 Rev. 2004. 3 pH 3.1 Suspensión y determinación potenciométrica.
Conductividad Eléctrica: Comisión de Normalización y Acreditación Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Metodo 9.1 Rev. 2004. 9 Conductividad Eléctrica 9.1 Extracto de saturación y determinación por conductivimétrica.
P Disponible: NOM-021-RECNAT-2000. Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de suelos. Estudios, Muestreo y Análisis 7.1.11. Fósforo extractible en suelos ácidos a neutros.
K Disponible: Comisión de Normalización y Acreditación Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Metodo 4.1 Rev. 2004. 4 Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio 4.1 Extracción con solución de acetato de amonio 1 mol/L a pH y determinación por espectrofotometría de absorción y emisión atómica. Con La.
Textura: NOM 021-RECNAT-2000 sección 7.1.9 Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis
C.S.C. NOM 021-RECNAT-2000 sección 7.3.20 Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis
Materia Orgánica: NOM 021-RECNAT-2000 sección 7.1.7 Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis
Carbonato de Calcio: NOM 021-RECNAT-2000 sección 7.3.25 Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis
Boro: NOM 021-RECNAT-2000 Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis 7.1.15. Determinación del contenido de boro.
Cobre, Hierro, Manganeso, Zinc: Comisión de Normalización y Acreditación Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Metodo 4.1 Rev. 2004. 4 Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio 4.1 Extracción con solución de acetato de amonio 1 mol/L a pH y determinación por espectrofotometría de absorción y emisión atómica. Con La.
Calcio: Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Comisión de Normalización y Acreditación. Sección 4.1 2004.
Magnesio: NOM 021-RECNAT-2000 sección 7.1.12 Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos. Estudios, Muestreo y Análisis
Sulfato: Comisión de Normalización y Acreditación Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo 2004. Métodos de análisis recomendados para suelos chilenos. B Azufre B.1 Extracción con solución de dihidrógeno fosfato de calcio 0,01 mol/L y determinación turbimétrica.

CERTIFICACIONES DEL PERÚ S.A.

GEO. GLORIA REYES ROBLES
 C.O.F. N° 470
 SUBGERENTE DE LABORATORIOS

"EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE"

Anexo 7. Parámetros de calidad de suelos proporcionados por CERPER S.A.

Rango de niveles de nutrientes en el suelo

Elemento	Unidad	Déficit	Medio	Adecuado
Oxido de Potasio	kg/ha	<300	300-600	>600
Calcio disponible	mg/kg	---	--	>1000
Magnesio disponible	mg/kg	<40	40-120	>120
Sulfato disponible	mg/kg	--	--	>60
Fosforo	mg/kg	<7	7-14	>14
Boro	mg/kg	<0.4	0.5-1.0	1.0-2.0
Cobre	mg/kg	<0.9	0.9-1.5	>1.5
Hierro	mg/kg	<12	12-50	>50
Manganeso	mg/kg	<15	15-29	>29
zinc	mg/kg	<3	3-5	>5

Rango del contenido de cationes cambiabiles

Cationes cambiabiles mEq/100 g			
	Bajo	Medio	Alto
Ca	<3.0	3.0-6.0	>6.0
Mg	<1.5	1.5-2.5	>2.5
K	<0.2	0.2-0.4	>0.4

Rango de valores de pH del suelo

Valor	Categoría
<5.5	Extremadamente acido
5.5-5.9	Moderadamente acido
6.0-6.5	Adecuado
6.6-7.3	Neutro
7.4-8.0	Alcalino
>8.0	Muy alcalino

Rango de valores de contenido de fosforo y porcentaje de materia orgánica

Fosforo olsen (mg/kg)		Materia orgánica (%)	
Bajo	<0.7	Bajo	<2
Medio	7.0-14.0	Medio	2.0-4.0
Alto	>14.0	Alto	>4.0

Rango de valores de conductividad eléctrica

Conductividad eléctrica C.E.*=C.E. x2	
0-2.0	Bajo salino
3.0-4.0	Ligeramente salino
4.0-8.0	Moderado
8.0-15.0	Fuerte
>15.0	Muy fuerte

Rango de valores de porcentaje de carbonato de calcio

Nivel de CaCO ₃ (%)	
0-1.0	Adecuado
1.0-8.0	Alto
9.0+	Muy alto

Anexo 8. Informe de Ensayo N° 1-08045/19 Análisis de metales por ICP



INFORME DE ENSAYO N° 1-08045/19

Pág. 10

Solicitante : **MARQUEZ ROCA LIBRETH**

Domicilio legal : **Av. Conchucos 288 - Urb. Tahuantinsuyo - Independencia - Lima - Lima**

Producto declarado : **EXTRACTO DE PLANTA DE CABUYA (AGAVE AMERICANA)**

Cantidad de Muestras para el Ensayo : **1 muestra x 500 mL**
Muestra proporcionada por el solicitante

Forma de Presentación : **En frascos de vidrio ámbar cerrado y refrigerado**

Fecha de recepción : **2019 - 09 - 04**

Fecha de inicio del ensayo : **2019 - 09 - 04**

Fecha de término del ensayo : **2019 - 09 - 11**

Ensayo realizado en : **Laboratorio ICP-AA**

Identificado con : **NIS 19009903 (EXAI-10295-2018)**

Validez del documento : **Este documento es válido solo para la muestra descrita**

Ensayo	LC	Unidad	Resultados
Aluminio (Al)	0,25	mg/kg	2,41
Androseno (DB)	0,25	mg/kg	<0,25
Arsenico (As)	0,05	mg/kg	<0,05
Bario (Ba)	0,05	mg/kg	0,63
Berilio (Be)	0,05	mg/kg	<0,05
Boro (B)	0,25	mg/kg	1,81
Cadmio (Cd)	0,05	mg/kg	0,23
Calcio (Ca)	2,5	mg/kg	2 864
Cerio	0,02	mg/kg	<0,02
Cobalto (Co)	0,05	mg/kg	<0,05
Cobre (Cu)	0,05	mg/kg	0,39
Cromo (Cr)	0,05	mg/kg	<0,05
Fluoruro (F)	5,1	mg/kg	<5,1
Gadolinio (Gd)	0,05	mg/kg	2,23
Hidruro (H)	5,5	mg/kg	598
Hierro (Fe)	5,2	mg/kg	1,22
Litio (Li)	0,15	mg/kg	<0,15
Magnesio (Mg)	0,25	mg/kg	1 168
Manganeso (Mn)	0,05	mg/kg	1,30
Mercurio (Hg)	0,01	mg/kg	<0,01
Niobio (Nb)	0,05	mg/kg	<0,05
Niquel (Ni)	0,05	mg/kg	<0,05
Óxido de Selenio	0,04	mg/kg	<0,04
Plata (Ag)	0,05	mg/kg	<0,05
Plomo (Pb)	5,1	mg/kg	<5,1
Potasio (K)	4,5	mg/kg	879
Selenio (Se)	0,25	mg/kg	<0,25
Sodio (Na)	1,5	mg/kg	<1,5
Talio (Tl)	0,25	mg/kg	<0,25
Tiempo (Ti)	0,15	mg/kg	<0,15
Vanadio (V)	0,05	mg/kg	<0,05
Zinc (Zn)	0,05	mg/kg	5,33

LC: Límite de certificación



AREQUIPA
Calle Toriberto Rodríguez Nº 1415
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000

PURIA
Urb. Argemón A - 2 - Plana
T. (073) 322 908 / 3275 63161

info@cerper.com - www.cerper.com

EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE



INFORME DE ENSAYO N° 1-08045/19

Pág. 3/2

MÉTODO

Metasles por ICP: EPA Method 200.7, 1994. Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopic Method for Trace Element Analysis of Water and Wastes.

OBSERVACIONES

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o servicio certificado del sistema de la entidad de la entidad que lo produce.

Callao, 12 de septiembre de 2019
BC

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.


OSCAR GUILLERMO REYES
C.P.W.
CONSEJERO DE ADMINISTRACIÓN

EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1416
Miraflores - Arequipa
T. (054) 265572

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Porta - Callao
T. (511) 319 6000
<http://cerper.com> - www.cerper.com

PIURA
Urb. Argemiro A - 2 - Piura
T. (073) 322 606 / 9975 63161

Anexo 9. Informe de Ensayo N° 1-08304/19 Análisis de azúcares por HPLC



INFORME DE ENSAYO N° 1-08304/19

Pág. 1/1

Solicitante	LIZBET MARQUEZ ROCA
Domicilio legal	Av. Caricashá 288 Urb. Tahuantinsuyo – Independencia – Lima – Lima
Producto declarado	EXTRACTO DE PLANTA DE CABUYA (AGAVE AMERICANA)
Cantidad de Muestras para el Ensayo	1 muestra 250 mL Muestra proporcionada por el solicitante
Forma de Presentación	En frasco de vidrio cerrado y refrigerado
Fecha de recepción	2019 - 09 - 16
Fecha de inicio del ensayo	2019 - 09 - 17
Fecha de término del ensayo	2019 - 09 - 17
Ensayo realizado en	Laboratorio de Física Química – Cromatografía
Identificado con	HS 19010484 (EXA) 54890-2019)
Validez del documento	Este documento es válido solo para las muestras descritas

Ensayo	LC	Unidad	Resultado
Azúcares individuales y totales	Fructosa	3,70 g/100 g	< 3,70
	Glicosa	3,70 g/100 g	= 3,70
	Lactosa	3,70 g/100 g	< 3,70
	Maltosa	3,70 g/100 g	= 3,70
	Sacarosa	3,70 g/100 g	= 3,70
Azúcares reductores	3,70	g/100 g	< 3,70
Azúcares Totales	3,70	g/100 g	= 3,70

LC Límite de cuantificación

MÉTODOS

Azúcares individuales y totales : AOAC 80-04 B1, H 19 Ed 2009. Determination of simple sugars in cereal products. HPLC Method

OBSERVACIONES

Prohíbese la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERPER S.A.
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado de calidad de la entidad que lo produce.

Callao, 20 de septiembre de 2019
AA

CERTIFICACIONES DEL PERU S.A.



ING. ROSA PALOMINO LOO
C. I. N. 40202
COORDINADORA DE LABORATORIOS

AREQUIPA
Calle Teniente Rodríguez N° 1415
Miraflores - Arequipa
T. (084) 265572

CALLAO
Oficina Principal
Av. Santa Rosa 601, La Perla - Callao
T. (511) 319 9000
info@ceper.com - www.ceper.com

PIURA
Urb. Angamos A-2 - Piura
T. (073) 322 908 / 9975 83161

“EL USO INDEBIDO DE ESTE INFORME DE ENSAYO CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LA LEY, POR LA AUTORIDAD COMPETENTE”

Anexo 10. Informe Técnico N° 2150-19-LABICER Análisis de fructosa por HPLC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS
LABICER (Laboratorio N° 12)
ANÁLISIS QUÍMICO, CONSULTORÍA E INVESTIGACIÓN



INFORME TÉCNICO N° 2150 – 19 – LABICER

1. DATOS DEL SOLICITANTE
 - 1.1 SOLICITANTE : LIZBET ROSA MÁRQUEZ ROCA
 - 1.2 O.N.I. : 44355020
2. FECHA DE EMISIÓN : 29 / 11 / 2019
3. ANÁLISIS SOLICITADO : ANÁLISIS DE FRUCTOSA POR HPLC
4. DATOS REFERENCIALES DE LA MUESTRA SEGÚN EL SOLICITANTE
 - 4.1 IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS : 01 MUESTRA DE EXTRACTO HIDROLIZADO DE CABUYA
5. LUGAR DE RECEPCIÓN DE LA MUESTRA : LABICER - FACULTAD DE CIENCIAS
6. CONDICIONES AMBIENTALES : Temperatura: 23.0°C; Humedad relativa: 69%
7. MÉTODO UTILIZADO : CROMATOGRAFÍA LÍQUIDA DE ALTO RENDIMIENTO (HPLC).
8. MÉTODO DE REFERENCIA ADAPTADO : AOAC Official Method 977.20 Separation of Sugars in Honey. Liquid Chromatographic Method.
9. EQUIPOS UTILIZADOS : CROMATÓGRAFO LÍQUIDO DE ALTO RENDIMIENTO: SHIMADZU.
 - Desgasificador: DGU-20A5R
 - Bomba: LC-30AD
 - Automuestreador: SIL-30AC
 - Horno de Columna: CTO-20AC
 - Detector de Índice de Refracción: RID-10A
 - Control de Sistema: CBM-20A
 EQUIPO ULTRASONIDO, WSD Laboratory Instruments.
EQUIPO DE AGUA ULTRA PURA. ELGA PURELAB.
10. REACTIVOS
 - Estándar de Fructosa, 99.99%, adquirido de HIMEDIA LABORATORIES PRIVATE LIMITED.
 - Acetonitrilo, gradient 240nm/uv HPLC grade, adquirido de MERCK PERUANA.
 - Agua ultrapura, purificada en equipo ELGA PURELAB CLASSIC UV.
11. CONDICIONES CROMATOGRÁFICAS

Columna	Ultra amino de 250 mm x 4.6 mm ID x 5 µm Partícula (Restek)
Horno de Columna	40°C
Detector	Detector de Índice de Refracción
Bomba	Customaria
Flujo	1.2 mL/min
Fase móvil	A: CH ₃ CN B: Agua ultrapura A-B, 90:10
Elución	Isocrática
Tiempo de corrida	20min
Integración	Área vs Concentración



12. RESULTADO

ANÁLISIS	RESULTADO ⁽¹⁾	R.S.D. ⁽²⁾
Fructosa	40.220 %	0.004%

⁽¹⁾ Ver cromatogramas en Anexo. Porcentaje expresado como masa entre volúmenes.

⁽²⁾ R.S.D.: Desviación estándar relativa.

13. VALIDEZ DEL INFORME TÉCNICO

El Informe técnico es válido solo para la muestra y las condiciones indicadas en los ítems del uno (1) al cuatro (4) del presente informe técnico.


Bach. Natzka Chávez
Analista
LABICER – UNI



M.Sc. Otilia Acha de la Cruz
Jefa de Laboratorio
Responsable de Análisis
CQP 202

El Laboratorio no se responsabiliza del muestreo ni de la procedencia de la muestra.

Anexo 11. Informe Técnico N° LAB.21-20-018 Análisis de HMF por Cromatografía-FID



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Química y Textil
Laboratorio N° 21 - Investigación y Química Aplicada

INFORME TECNICO
LAB.21-20-018

SOLICITANTE : LIZBET MARQUEZ ROCA
DNI : 44355020
REGISTRO : S20-018
MUESTRA : FASE ORGANICA FRUCTOSA ESTANDAR-(FOE)
 Muestra identificada y proporcionada por el solicitante
ENSAYO : ANALISIS X CROMATOGRAFIA - FID
FECHA : 21-02-2020

REPORTE DE RESULTADOS

Archivo de cromatograma	Muestra	HMF tR	Concentración HMF mg/mL
Liz03-std	HMF Std	28,90	0,7652
Nel10-FOE	FOE	29,01	0,008

La muestra FOE tiene contaminantes que salen cerca del HFM trasladan ligeramente las señal de HMF.

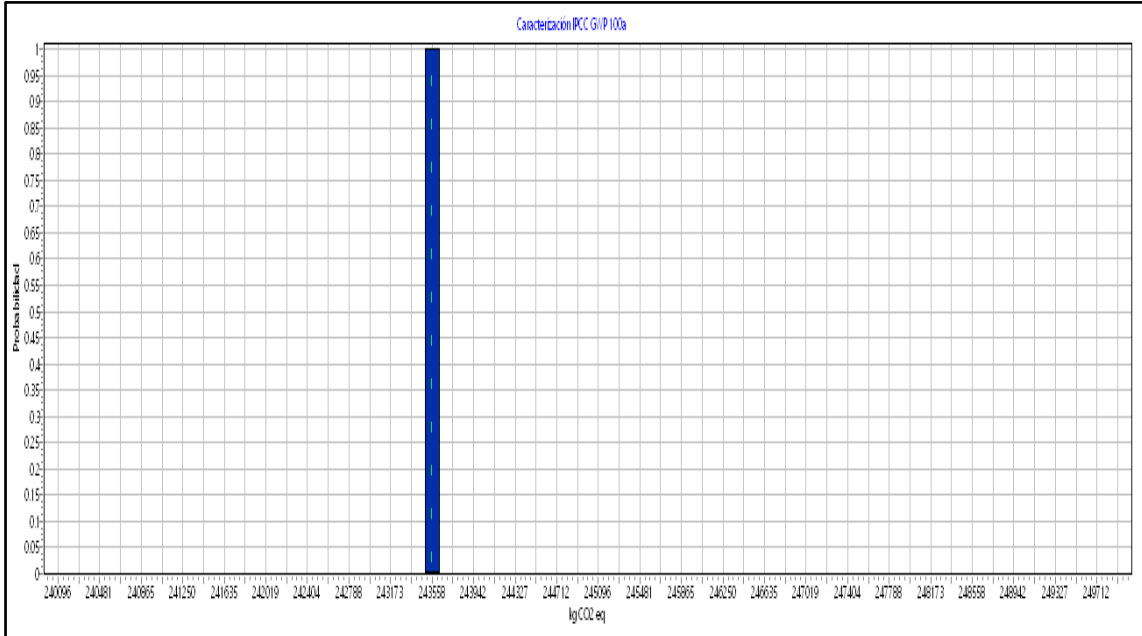
Atentamente,



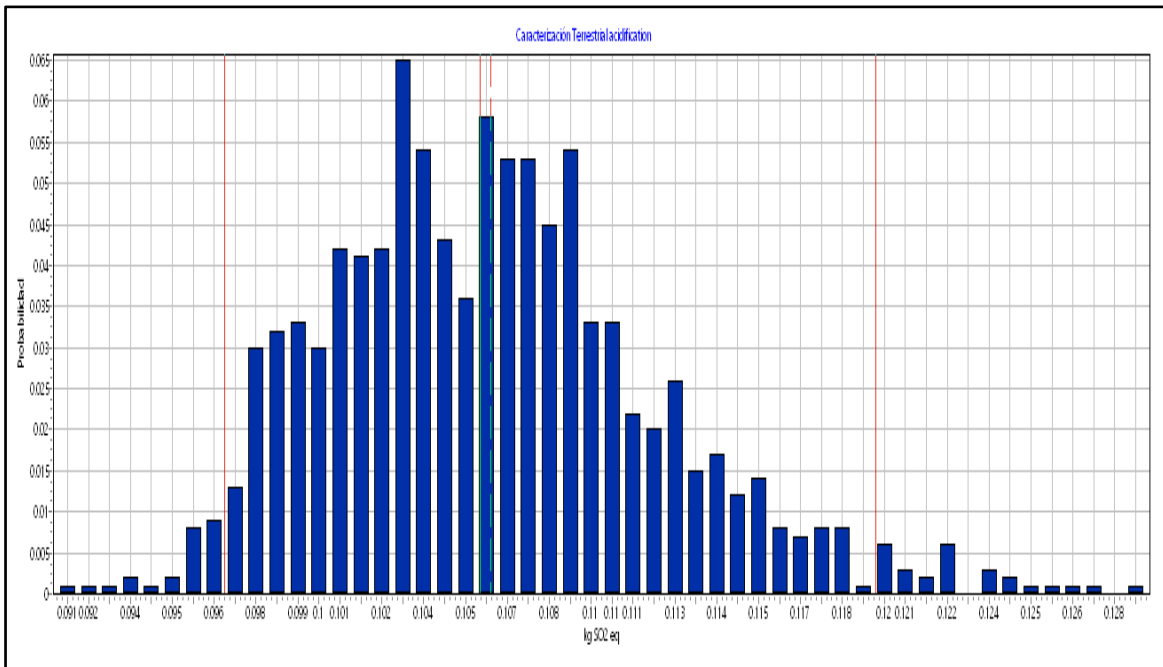
ING. TEODARDO JAVIER CARDENAS MENDOZA
Jefe del Laboratorio N° 21

Ax. Túpac Amaru 210 - Lima 25 - Perú - Aptdo. 1301
 Telefax: 481-0662 / Telefax: 481-7919
 E-mail: lab21_fiq@uni.edu.pe

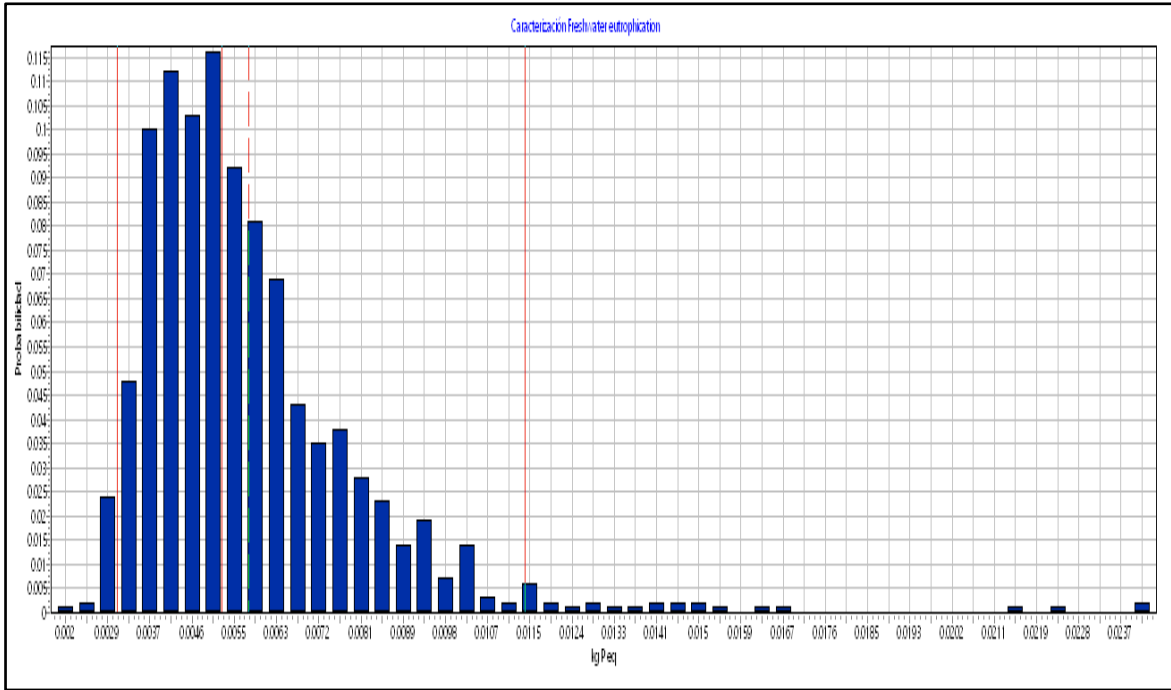
**Anexo 12. Rango de incertidumbre de los impactos ambientales
caracterizados mediante Simulación de Monte Carlo**



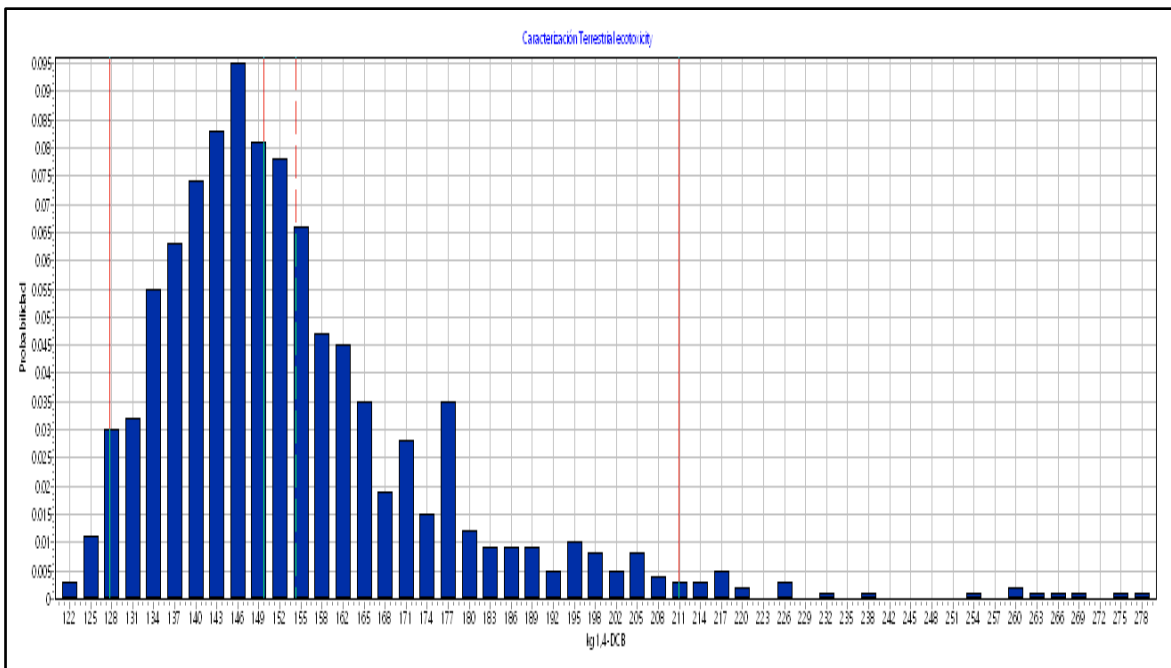
Análisis de Incertidumbre de la categoría Calentamiento Global



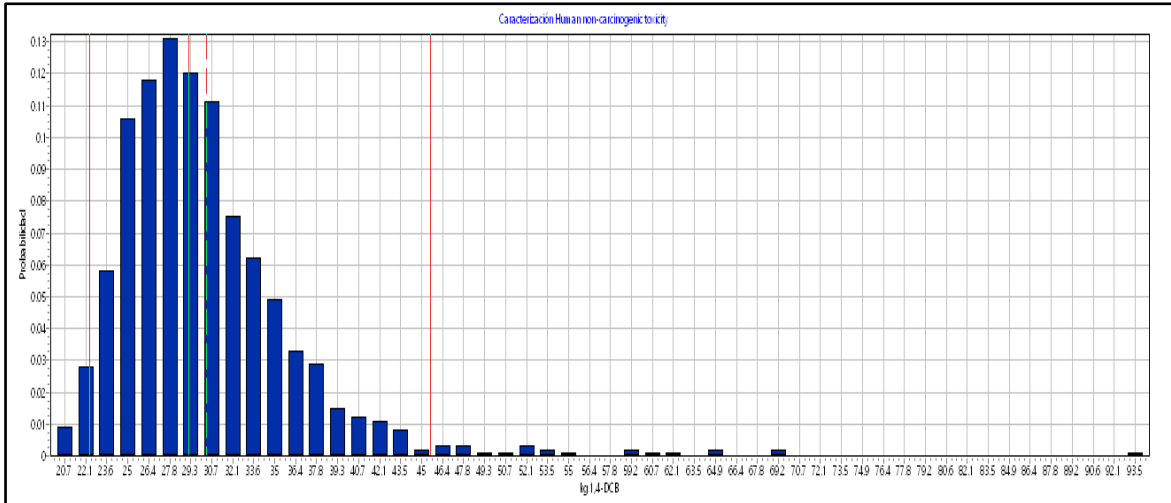
Análisis de Incertidumbre de la categoría Acidificación



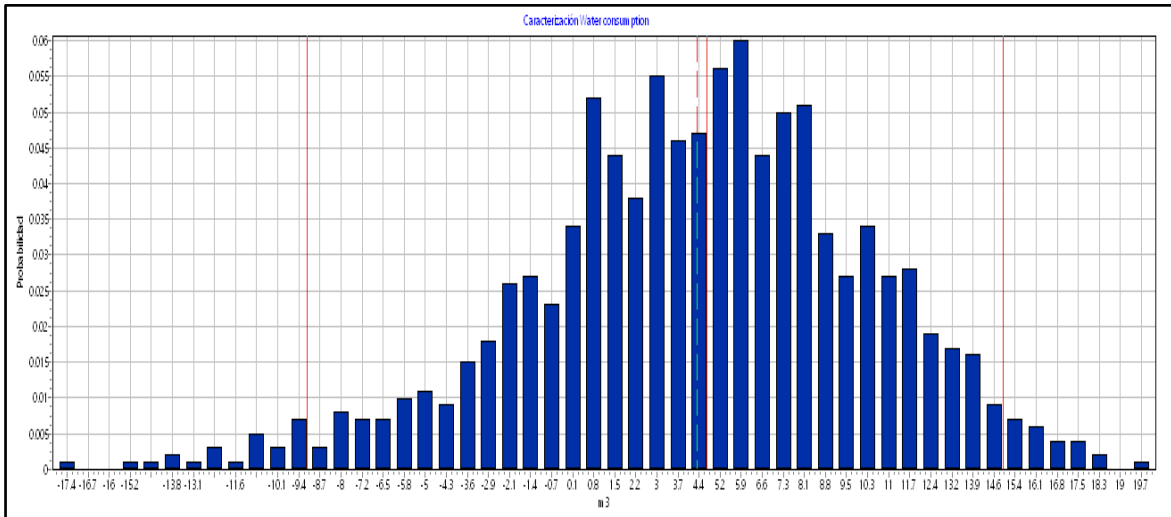
Análisis de Incertidumbre de la categoría Eutrofización



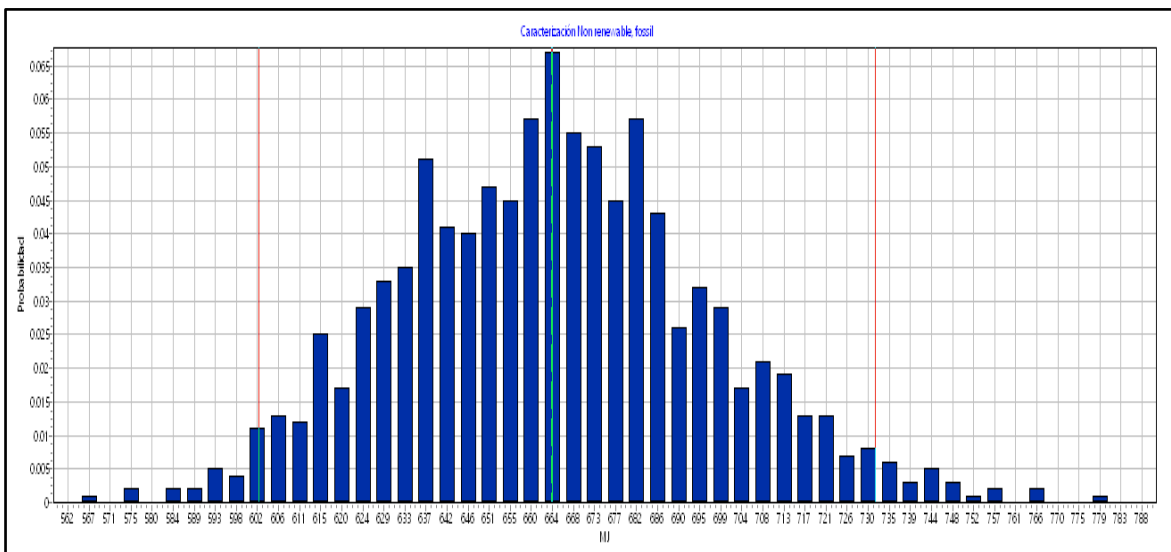
Análisis de Incertidumbre de la categoría Ecotoxicidad



Análisis de Incertidumbre de la categoría Toxicidad Humana



Análisis de Incertidumbre de la categoría Consumo de agua



Análisis de Incertidumbre de la categoría Consumo de energía fósil