Análisis de Ciclo de Vida para la obtención de furfural a partir de biomasa residual del cultivo de café: Estudio de caso, Puente Nacional – Santander

Yined Carolina Caicedo Vinchira
Código de proyecto: 2201-005

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, 8 noviembre 2022

Análisis de ciclo de vida para la obtención de furfural a partir de biomasa residual del cultivo de café: estudio de caso, Puente Nacional – Santander

Yined Carolina Caicedo Vinchira

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director:
William Giovanni Cortés Ortiz
Codirector:
Carlos Alberto Guerrero Fajardo

Línea de Investigación:
Química Aplicada y Aprovechamiento de Residuos Agrícolas y Agroindustriales

Universidad El Bosque

Facultad de Ingeniería

Programa Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2022

Tabla de contenido

Tabla de contenido 3
Listado de tablas 4
Listado de figuras 5
Listado de siglas y abreviaturas 5
Resumen 6
Abstract 6
Introducción 6
Planteamiento del problema 7
Pregunta de investigación 9
Hipótesis 9
Justificación 10
Objetivos 10
Objetivo General 10
Objetivos Específicos 10
Marcos de referencia 11
Antecedentes 11
Estado del arte 11
Marco Teórico 13
Marco Conceptual 14
Marco Geográfico 14
Marco Normativo 16
Marco Institucional 16
Metodología 17
Tipo de investigación 17
Alcance y objetivo del ACV 18
Metodología para objetivo específico 1 18
Metodología para objetivo específico 2 18
Metodología para objetivo específico 3 19
Aspectos éticos 19
Resultados, análisis y discusión 19
Inventario de Ciclo de Vida (ICV) 21

Justificación de los datos obtenidos 30
Evaluación de los impactos ambientales identificados en el ICV 32
Categorías de impacto 32
Aspecto económico 37
Interpretación de los resultados del inventario y evaluación del ciclo de vida 39
Análisis de integridad 39
Análisis de sensibilidad 40
Análisis de coherencia 40
Conclusiones y recomendaciones 41
Bibliografía 43

Listado de tablas

Tabla 1. Residuos obtenidos en el beneficio e industrialización de 1.0 Kg de café cereza. 8
Tabla 2. Datos registrados en la Federación Nacional de Cafeteros 8
Tabla 3. Normas que reglamentan y orientan el desarrollo del análisis de ciclo de vida. 16
Tabla 4. Instituciones clave para el desarrollo del proyecto en cuestión. 16
Tabla 5. Resultados obtenidos del diseño factorial dos a la dos implementado en las etapas de tratamiento hidrotérmico y reacción catalítica. 26
Tabla 6. Inventario de Ciclo de Vida del proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual del cultivo de café. 29
Tabla 7. Energía consumida en cada etapa y equipo usado en el proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual de cultivo de café. 36
Tabla 8. Energía consumida en durante la síntesis del catalizador. 36
Tabla 9. Resumen de costos investidos en cada una de las etapas del proceso de obtención de furfural. 37
Tabla 10. Referencias usadas para establecer potencia de los equipos. 40
Tabla 11. Cantidad y costos de furfural obtenido. 41

Listado de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio Puente Nacional, Santander. Tomada de Google Earth modificada con Rincón Gamba (2017). 15

Figura 2. Etapas principales del proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual de cultivo de café. 21

Figura 3. Recolección de la biomasa residual en Puente Nacional, Santander. 22

Figura 4. Caracterización física de la biomasa residual de cultivo de café. 22

Figura 5. Tratamiento hidrotérmico. 23

Figura 6. Curva de calibración a partir de la cuantificación por HPLC de xilosa y furfural utilizando concentraciones conocidas. 24

Figura 7. Cuantificación de xilosa y furfural por HPLC utilizando la muestra resultante del tratamiento hidrotérmico. 24

Figura 8. Síntesis de catalizador. 25

Figura 9. Reacción catalítica. 25

Figura 10. Cuantificación de xilosa y furfural por HPLC de la muestra producto de la reacción catalítica. 26

Figura 11. Fotografías tomadas durante la recolección de la biomasa residual y el tratamiento físico.. 27

Figura 12. Fotografías tomadas en el proceso químico que comprende las demás etapas del ACV. 28

Figura 13. Resultados de la curva de calibración para los azucares. 35

Figura 14. Procesos requeridos para suplir de energía a la población. Tomado de CREG, (2004). 38

Listado de siglas y abreviaturas

ACV: Análisis de Ciclo de Vida

ICV: Inventario de Ciclo de Vida

EIA: Evaluación de Impacto Ambiental

Resumen

En la presente investigación se desarrolla el Análisis de Ciclo de Vida de la obtención de furfural a partir de biomasa residual de cultivo de café, para lo cual se extrajeron muestras de una finca cafetera ubicada en Puente Nacional, Santander. Fueron cuatro fases de elaboración: definición del objetivo y alcance del ACV, desarrollo del inventario de ciclo de vida, evaluación de los impactos ambientales identificados y la interpretación de los resultados obtenidos. A partir de estos procesos, fue posible determinar la cantidad de furfural obtenido por cada gramo de biomasa residual el cual fue de 38,5872 mg a un costo de $1.805.996. Esto permitió concluir que la obtención de furfural a partir de biomasa residual de cultivo de café, no genera fuertes impactos ecológicos potenciales a diferencia del impacto económico, el cual demuestra que la implementación de la propuesta puede ser factible pero no viable.

Palabras clave: residuos orgánicos, aprovechamiento, mitigación de impactos, evaluación de impactos.

Abstract

In this investigation, the Life Cycle Analysis of obtaining furfural from residual biomass of coffee cultivation is developed, for which samples were extracted from a coffee farm located in Puente Nacional, Santander. There were four elaboration phases: definition of the objective and scope of the LCA, development of the life cycle inventory, evaluation of the identified environmental impacts and the interpretation of the results obtained. As a result from these processes, it was possible to determine the amount of furfural obtained per gram of residual biomass to be 38.58717 mg at a cost of $1,805,996. This allowed the conclusion that while obtaining furfural from residual biomass of coffee cultivation does not carry strong potential ecological impacts, it carries a rather significant economic impact, which showed that the implementation of this proposal would be feasible but not viable.

Keywords: organic waste, use, impact mitigation, impact assessment.

Introducción

El furfural es un compuesto químico de alta importancia ya que puede ser empleado en varios campos como la producción de productos farmacéuticos y biopolímeros. Este compuesto se puede obtener a partir de residuos orgánicos con altos contenidos de hemicelulosa, la cual es un polímero conformado principalmente por monómeros de xilosa. En el proceso tradicional para obtener furfural se deshidratan las pentosas (xilosa) presentes en la biomasa empleando catalizadores ácidos (Silva Forero 2019). Teniendo esto en cuenta, a nivel industrial se utilizan soluciones de ácidos minerales como el ácido sulfúrico, ácido nítrico o ácido clorhídrico, lo que genera un alto impacto ambiental en su producción. Así, durante el proceso se evidencian varios efectos negativos relacionados con el tratamiento de residuos de los procesos ácidos, en donde la separación, purificación y recuperación de estos son costosos y técnicamente complejos (Dashtban, Gilbert, and Fatehi 2012).

Por lo anterior, investigaciones recientes proponen diferentes alternativas de obtención que generen menor impacto ambiental. Una de ellas, es la que se analiza en el presente documento, la cual permite obtener furfural a partir de biomasa residual de cultivo de café utilizando catalizadores sólidos heterogéneos en lugar de los ácidos minerales convencionales. Esta propuesta que es innovadora para el contexto nacional y busca aprovechar un residuo de alta generación en Colombia, requiere conocer su nivel de impacto ambiental y por ende su viabilidad para implementarla (Rodríguez Valencia and D. Zambrano Franco 2010).

Es por ello, que el presente proyecto de investigación tiene como eje central desarrollar el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) del proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual del cultivo de café. Para esto, inicialmente se tomaron muestras de residuos del cultivo de café de una finca cafetera ubicada en el municipio Puente Nacional del departamento de Santander. Posteriormente las muestras fueron caracterizadas en la Universidad El Bosque y se evaluó la obtención de furfural empleando un reactor de acero inoxidable con atmosfera inerte.

Con base en lo anterior es importante destacar que, el ACV es una de las metodologías de identificación y evaluación de impactos ambientales más utilizadas, ya que permite conocer en detalle cuáles son los procesos unitarios, es decir las etapas del proceso, entradas y salidas, y los impactos que cada uno de ellos genera. Lo anterior, facilitando la toma de decisiones respecto a la pertinencia de implementar la metodología propuesta desde un punto de vista ambiental y también permite identificar con mayor claridad en qué procesos se puede reducir el impacto y/o los costos, para hacer más sostenible el proceso (Eurofins 2021a).

Planteamiento del problema

Teniendo en cuenta que el presente trabajo de investigación busca el aprovechamiento de la biomasa, se inicia entendiendo su significado. Según la Real Academia Española, la biomasa es la materia orgánica originada de procesos biológicos, espontáneos o provocados, que se utiliza mayormente como fuente de energía (Peñaranda Gonzalez, Montenegro Gómez, and Giraldo Abad 2017a; RAE 2021). La biomasa genera aproximadamente 220 millones de toneladas de peso seco al año a nivel mundial, lo que representa unas 10 veces la demanda energética global (Rodríguez Valencia and D. A. Zambrano Franco 2010); datos como estos, permiten visibilizar su oportunidad de aprovechamiento de diferentes maneras.

Seguido a lo anterior, uno de los procesos agrícolas que genera gran cantidad de biomasa es el cultivo de café, algunos datos del contexto internacional, para conocer su permanencia en el tiempo y el posible crecimiento a corto plazo es que, en cerca de 80 países, el cultivo y cosecha del café es el medio de sustento para más de 25 millones de personas. El 70 % de las labores son hechas por mujeres, que cobran menos que los hombres y pocas veces son propietarias de plantaciones, y el último dato, es que para cubrir la demanda que se prevé en 2050, la superficie de los cultivos debería incrementarse 2,5 veces (Rodríguez Valencia and D. A. Zambrano Franco 2010).

En el contexto nacional, se tiene que Colombia es el segundo productor de café en el mundo, sumándose a los cerca de 80 países que lo cultivan en Latinoamérica, Asia y África. Esto sitúa al café como el cultivo nacional más relevante del sector agrícola (Peñaranda Gonzalez, Montenegro Gómez, and Giraldo Abad

2017b). Por otra parte, es importante destacar que los residuos generados por el cultivo de café muchas veces no son aprovechados y su manejo se puede convertir en un problema para el cultivador, ya que como el resto de residuos agrícolas, en la mayoría de casos se incineran o son llevados a relleno sanitario (Peñaranda Gonzalez et al. 2017b). De esta manera, en la tabla 1, se presentan los residuos obtenidos del cultivo café en las etapas de producción y tratamiento inicial.

Tabla 1. *Residuos obtenidos en el beneficio e industrialización de 1.0 Kg de café cereza.*

Proceso	Residuo obtenido	Pérdida (g)
Despulpado	Pulpa fresca	436
Desmucilaginado	Mucilago	149
Secado	Agua	171
Trilla	Pergamino	42
Torrefacción	Volátiles	22
Preparación de bebida	Borra	104
Pérdida acumulada	924	

Fuente: (Rodríguez Valencia and D. A. Zambrano Franco 2010)

Con base en la tabla 1, se observa que el despulpado y desmucilaginado genera 585 g de material residual, asociados a la pulpa fresca y el mucilago, respectivamente. Así, estos dos residuos pasan a ser relevantes para el desarrollo del ACV ya que tienen el mayor porcentaje de generación por cada mil gramos de café de cereza y son ricos en azúcares, vitales para la obtención de sustancias químicas de interés comercial como el furfural (Khoo et al. 2015).

Por otra parte, es importante resaltar que el mucílago y la pulpa constituyen el 58,43 % del grano de café aproximadamente. De esta manera, más de la mitad del fruto se convierte en residuo lo cual abre la oportunidad de realizar estudios que permitan aprovechar esta biomasa. En la tabla 2, se presenta la producción promedio, la generación de residuos por cada millón de sacos y la contaminación equivalente a la excreta y orina generada, esto último, a modo comparativo para conocer con más detalle el impacto.

Tabla 2. *Datos registrados en la Federación Nacional de Cafeteros*

	Peso del fruto seco	Producción promedio	Generación de cada millón de sacos (60kg)	Contaminación equivalente a la excreta y orina generada
Mucílago	14,85%	768 kg/ha-año	55500 ton	310000 hab/año
Pulpa	43,58%	2266 kg/ha-año	162900 ton	868736 hab/año

Fuente: (Rodríguez Valencia and D. A. Zambrano Franco 2010).

De acuerdo con la información de la tabla 2, se observa una mayor producción de pulpa residual al año,

con 2266 kg por hectárea, respecto a 768 kg por hectárea de mucílago. En consecuencia, se observa que el impacto de contaminación equivalente a la excreta y orina generada es mayor para la pulpa residual.

De acuerdo con lo presentado anteriormente, ante la alta generación de biomasa residual, surge la propuesta de aprovechamiento para la obtención de productos químicos de interés comercial como el furfural. El furfural es un compuesto químico que se utiliza en varias aplicaciones como fungicidas, nematicidas, adhesivos, compuestos aromatizantes y recuperación de lubricantes de refinería, e incluso como precursor de otras sustancias químicas como el 5-metil furfural $C_6H_6O_2$ o el alcohol furfurílico $C_5H_6O_2$, entre otros (Raman and Gnansounou 2017).

Adicional a ello, y como se mencionó previamente, a nivel industrial y de manera tradicional, el furfural se obtiene a partir de procesos ácidos, lo que genera altos impactos negativos (Dashtban et al. 2012). Es por ello, que en el presente trabajo de investigación se implementa el análisis de ciclo de vida al proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual de café a escala de laboratorio, empleando catalizadores sólidos heterogéneos. Lo anterior, con el fin de evaluar los impactos ambientales del proceso y analizarlo con un enfoque ecológico, económico, social e incluso académico.

Pregunta de investigación

¿De acuerdo con el análisis de ciclo de vida, cuáles son las variables que generan mayor impacto ambiental en el proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual del cultivo de café?

Hipótesis

En este apartado se presentan tres hipótesis: la hipótesis general, nula y alternativa (Muñoz Razo 2011). Así, la hipótesis general de la presente investigación es que la variable con mayor impacto negativo es la económica, ya que los costos requeridos para realizar procesos experimentales son elevados. En cuanto a las variables ecológicas, el impacto será menor porque el laboratorio tiene condiciones controladas y entre los insumos usados no se encuentras ácidos o sustancias de alta peligrosidad para la salud humana o los ecosistemas.

La hipótesis alternativa es que la variable de impacto para el aspecto social es el relacionado con la academia y la investigación, lo cual puede ser positivo respecto a los avances que aporta a la investigación en temas de aprovechamiento de biomasa residual y obtención de sustancias químicas. De acuerdo con lo anterior, se espera que la viabilidad de implementar esta nueva metodología sea nula a corto plazo y con baja probabilidad a mediano y largo plazo.

Como consecuencia, la hipótesis nula será lo contrario a lo supuesto anteriormente, respecto al nivel de impacto generado por los contaminantes ecológicos, los recursos económicos, el rendimiento de furfural y los aportes investigativos, aumentando así su viabilidad de implementación.

Justificación

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV), es una herramienta utilizada en el área de investigación para optimizar procesos productivos y por la cual se van a identificar, clasificar, cuantificar y evaluar los impactos ambientales generados, para establecer la viabilidad del proceso productivo desde un enfoque sostenible. Según la norma ISO 14044, esta es una metodología para la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida (Organización Internacional de Normalización [ISO], 14044 de 2006).

Por otra parte, de acuerdo con Esperanza Leiva, el ACV es la metodología que permite analizar de manera objetiva, metódica, sistémica y científica los impactos ambientales que un producto o servicio puede generar durante todas las etapas desde la obtención de la materia prima hasta la producción, teniendo encuentra el alcance y los límites del sistema establecidos para el caso particular. De esta manera, algunas de las ventajas del ACV es el establecimiento de criterios de evaluación y valoración de procesos de producción, la facilidad para comparar procesos y establecer así puntos o etapas críticas y de mayor impacto, y la mejora en selección de alternativas y toma de decisiones (Leiva 2016).

Es por ello, que este ACV cumple con unas etapas de desarrollo aplicado al proceso de obtención de furfural a partir de residuos del cultivo de café, las cuales son: i) identificar las variables involucradas en el proceso, ii) evaluar los impactos ambientales que genera y iii) realizar un análisis de integridad, sensibilidad y coherencia con el fin de conocer la viabilidad del proceso.

Teniendo esto en cuenta, el desarrollo de este proyecto de grado tiene relación directa con la ingeniería ambiental porque requiere utilizar conceptos y/o métodos claves, como es el caso de la Gestión Ambiental Empresarial (GEA), la Teoría General de Sistemas (TGS) y la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) a partir de métodos como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), con ellos, se permite tener un enfoque sistémico en el proyecto para identificar con éxito los impactos ambientales más relevantes en el proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual de cultivo de café.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar el Análisis de Ciclo de Vida del proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual del cultivo de café, a través de la inclusión de las variables involucradas en la transformación, con el fin de evaluar los impactos ambientales que se generan.

Objetivos Específicos

1. Identificar las variables involucradas en el proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual del cultivo de café, con el fin de obtener el Inventario de Ciclo de Vida (ICV)
2. Evaluar los impactos ambientales generados en la transformación de biomasa residual de cultivo de café a furfural, asociando los resultados del ICV a los impactos ambientales, y así obtener el perfil ambiental del proceso.

3. Interpretar los resultados del inventario y evaluación del ciclo de vida, a partir del análisis de integridad, sensibilidad y coherencia, con el fin de establecer la viabilidad de obtención de furfural a partir de la biomasa residual de cultivo de café.

Marcos de referencia

Antecedentes

Este apartado presenta a grandes rasgos la historia del Análisis de Ciclo de Vida desde sus inicios y evolución hasta la actualidad. De acuerdo con el libro publicado el presente año en Chile "*Análisis De Ciclo De Vida: Fundamentos Y Aplicaciones A La Gestión Sustentable De Los Recursos Hídricos*" (Vidal, Neumann, and Hospido 2022), los inicios del ACV fueron en 1969 cuando el Midwest Research Institute (MRI) de Estados Unidos, en su búsqueda por reducir emisiones atmosféricas, examinó el ciclo de vida de los empaques para cuantificar el uso de energía, materiales y sus consecuencias ambientales. El MRI estudió diferentes envases de la Compañía Coca-Cola, y el estudio fue llamado "Resources and Environmental Profile Analysis (REPA)".

Los años siguientes, entre 1970 y 1990, iniciaron las aproximaciones de terminología y resultados del ACV sin mayor profundidad. Fue hasta la siguiente década (1990-2000) que se hondo en el uso y su importancia, llegando incluso a la primera definición por la Sociedad de Toxicología y Química Ambiental (SETAC por sus siglas en inglés) una organización europea, que junto con la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés) crearon el marco metodológico estandarizado, terminologías estandarizadas y armonización de los métodos de ACV, en las normas ISO 14042 y 14043, siendo estas las primeras en profundizar en la estructuración para el desarrollo del ACV.

Durante los siguientes diez años se crearon asociaciones internacionales, en Europa principalmente, que profundizaron y dieron mayor relevancia al ACV, levantando líderes que lo involucraron incluso en políticas ambientales y fomentaron su integración a la economía y sociedad. Esto permitió que en la actualidad el ACV sea considerado de gran importancia para la economía circular, la sostenibilidad e incluso el desarrollo de huellas ambientales como la de carbono e hídrica (Vidal et al. 2022).

Estado del arte

En este apartado se relacionan algunos de los trabajos de investigación asociados a la propuesta planteada en este proyecto. En cada uno de ellos se desarrolló un ACV para determinar el rendimiento en la obtención de sustancias químicas, entre las que se encuentra el furfural. Estos antecedentes permiten conocer estudios similares al que se trabaja en el presente documento, y tomarlos como guía o soporte para su desarrollo. Sin embargo, se debe tener en cuenta que cada uno de ellos fue realizado en el territorio o situación específica, lo cual difiere con el ACV del presente documento ya que se realizó a escala de laboratorio, en el que se tienen condiciones controladas.

En el primer artículo *"Life cycle and sustainability assessments of biorefineries producing glucaric acid, sorbitol or levulinic acid annexed to a sugar mill"* el objetivo fue evaluar la viabilidad ambiental de seis biorrefinerías lignocelulósicas autosuficientes energéticamente, anexas a un ingenio azucarero convencional, que producen sorbitol, ácido glucárico o ácido levulínico así como furfural y gamma

valerolactona con cogeneración eléctrica. En este se realizó un análisis del inventario de ciclo de vida, una evaluación de impactos y una interpretación de resultados en la etapa final. Se destaca que la biorrefinería que produce ácido glucárico mediante pretratamiento con ácido diluido fue el más favorable por generar el menor impacto ambiental, aunque entre las demás se obtuvo el mayor rendimiento a nivel socioeconómico, pero con mayores impactos negativos al ambiente (Kapanji, Farzad, and Görgens 2021).

En el siguiente documento, *"Life cycle assessment of ethanol produced in a biorefinery from liquid hot water pretreated switchgrass",* los autores reportan que se realizaron evaluaciones del ciclo de vida del bioetanol, combustible producido en Uruguay a partir de pasto varilla pretratado con agua caliente líquida para dos escenarios: la producción de etanol y electricidad y una biorrefinería que produce etanol, electricidad, furfural, ácido acético y fórmico. La composición del pasto varilla, la dosificación de enzimas, la eficiencia de la fermentación y la hidrólisis y el contenido de sólidos tuvieron un efecto significativo en el desempeño ambiental, siendo el uso de enzimas el factor más significativo (Larnaudie, Ferrari, and Lareo 2021).

También se tiene la siguiente publicación *"Chapter 5 - Life Cycle Assessment of Vetiver-Based Biorefinery With Production of Bioethanol and Furfural"* en la que se sugiere que, en países densamente poblados y basados en la agricultura como India, la materia prima lignocelulósica convencional, como la paja de arroz y la paja de trigo, es una fuente importante de alimento para animales y, por lo tanto, la materia prima no convencional que podría cultivarse en tierras baldías debe explorarse para cumplir con el suministro de materia prima lignocelulósica en los próximos años. Es por ello, que se realizó la evaluación del ciclo de vida (ACV) del vetiver, una materia prima lignocelulósica no convencional, para la producción de bioetanol y bioquímicos en la India. Se realizó una ACV para comparar los impactos ambientales de un sistema de biorrefinería basado en vetiver con un sistema convencional. Cabe mencionar que el análisis indicado por los autores muestra que el uso de biomasa de vetiver como fuente de energía en una planta de biorrefinería reduce la emisión de dióxido de carbono y el consumo de petróleo fósil de manera significativa en un 100% y un 60% para bioetanol y furfural respectivamente (Raman and Gnansounou 2017).

Por último, en el artículo *"Análisis de ciclo de vida y su aplicación a la producción de bioetanol: Una aproximación cualitativa"* se destaca la importancia de la metodología del Análisis de Ciclo de Vida para la evaluación del desempeño ambiental de procesos de la industria química. Mediante un estudio de caso, se proporciona una aproximación cualitativa para la aplicación del análisis de ciclo de vida durante el diseño del proceso de producción de alcohol carburante a partir de caña de azúcar. Para las etapas del proceso en la planta de producción, se tuvieron en cuenta datos obtenidos de la simulación de la conversión de caña en etanol empleando Aspen Plus. La cuantificación de los impactos ambientales se realizó mediante el software WAR GUI. Se destacan las principales ventajas del análisis de ciclo de vida durante el diseño de procesos amigables ambientalmente, así como sus limitaciones más importantes cuando se aplica esta metodología en Colombia. Esto último, porque en cuanto a la recolección de información, los autores proponen incorporar, en la medida de lo posible, datos e indicadores obtenidos de procesos realizados en las condiciones colombianas para utilizarlos en el ACV, situación que va poco a poco en constante mejora (Sánchez, Cardona, and Sánchez 2007).

Estas investigaciones presentadas, se tomaron como una hoja de ruta para el desarrollo del ACV, porque permitió conocer las técnicas ya trabajadas para la etapa del inventario de ciclo de vida con la recolección de datos, por ejemplo. También permitió conocer que la materia orgánica ha sido trabajada en diferentes partes del mundo para extraer sustancias como el furfural.

Marco Teórico

Este apartado permite conocer algunas de las teorías principales que dan claridad acerca de la relevancia de un Análisis de Ciclo de Vida y permiten comprender lo que se busca al implementarlo en procesos como el de obtención del furfural a partir de biomasa residual de cultivo de café.

Como se mencionó en la justificación de este documento, la *Teoría General de Sistemas* es una de las que permite comprender desde la ingeniería que, al observar un proceso particular como un sistema, se deben conocer sus partes y a su vez, estudiarlas sin desvincularlas del sistema como un todo que es integral. Por ello, también se necesita conocer las relaciones e interrelaciones que existen entre las partes y el todo del sistema, para que de esta manera se comprenda el comportamiento generalizado, ya sea de una problemática, una situación particular o una metodología propuesta (Tamayo Alzate 1999).

Para el caso de este ACV, al verlo desde la TGS, se puede estudiar la metodología propuesta para la obtención del furfural como el todo, el sistema central, del cual se desprenden diferentes partes o etapas para la obtención final. Es necesario estudiarlo como un sistema porque cada etapa es relevante en cuanto al impacto que pueda ejercer, y para este caso específico, la influencia que tiene cada una de ellas para determinar la viabilidad de obtención desde lo ecológico, económico y social o cultural; es esto lo que busca el ACV.

Otra de las teorías que cobra importancia es el de la *Ecología Industrial*, de la cual se considera que su funcionamiento se asemeja a los ecosistemas naturales porque busca reducir al máximo los residuos generados al reincorporarlos nuevamente al sistema, lo cual puede ser comprendido desde la economía circular. Esta teoría, nace de la *Economía Ecológica* que ve el sistema natural y económico como un solo sistema conectado que dependen entre sí. En ambas teorías se requiere entonces, entender y analizar los flujos de materia y energía que ocurren en el sistema para identificar de qué manera se puede reducir el impacto ambiental al mismo tiempo que se busca reducir los costos para que de esta manera aumente su viabilidad de implementación (Carrillo González 2009).

Por último, se encuentra la teoría de los *Stakeholder o Grupos de Interés*, que en un principio se puede creer que no tiene mucha relación con la presente investigación, porque se trata de un sistema que no es tan abierto al ser a escala de laboratorio. Sin embargo, si presenta stakeholders que como afirma la teoría, son aquellos individuos o grupos de interés que de manera voluntaria o involuntaria pueden afectar o ser afectados o influenciados por el funcionamiento y desarrollo del sistema (Fernández Fernández and Bajo Sanjuán 2012).

Para este caso entonces, algunos de los stakeholders son los investigadores de la nueva metodología propuesta, los tutores que orientan cada etapa, las instituciones involucradas e interesadas en el desarrollo y resultados del ACV, las cuales son la Universidad El Bosque y la Universidad Nacional de Colombia, además del autor del proyecto, quien es el primero en influenciar positiva o negativamente el desarrollo eficiente del ACV.

Marco Conceptual

Se presentan a continuación, las principales definiciones y conceptos asociados al desarrollo de la investigación que son clave para su comprensión. Se inicia con el *furfural* el cual es un aldehído aromático, con una estructura en anillo, cuya masa molar es 96.09 g/mol. Utilizado como producto intermedio para la producción de otros productos químicos. También se utiliza como solvente en la industria de refinación de aceites lubricantes, como materia prima en la fabricación de resinas y en la fabricación de plásticos (Castillo, Ferreyra, and Gherardi 2019).

Por otro lado, el *mucílago* hace parte de la biomasa residual de los cultivos de café. Es una sustancia viscosa, con transparencia, que se halla en ciertas partes de algunos vegetales (Farela Lara 2017). Junto con la pulpa, representa el 58,43 % del residuo de café por cada grano de café aproximadamente (Rodríguez Valencia and D. A. Zambrano Franco 2010).

Los siguientes, son términos definidos por la ISO 14044 referentes al ACV los cuales a su vez son conceptos claves de este documento (ISO, 14044 de 2006). Iniciando por el principal, se tiene que el *Análisis de Ciclo de Vida (ACV)* es una metodología en la que se realiza la recopilación y evaluación de las entradas, salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida. Esto permite que se utilice como una de las principales herramientas de gestión ambiental para evaluación de impactos, la cual se puede trabajar en diferentes escalas o situaciones particulares. El ACV está conformado por tres etapas principales que son el inventario del ciclo de vida, la evaluación de los impactos identificados y la interpretación de los resultados, etapas que son descritas a continuación.

El *Inventario de Ciclo de Vida (ICV)* es la primera fase del ACV, después de definir objetivo y alcance, en el cual se realiza el inventario, listado o compilación de los datos de entrada y salida en relación con el sistema bajo estudio. Implica entonces la recopilación de los datos necesarios para cumplir los objetivos del estudio definido y los cuales se enmarcan a los flujos de materia y energía.

Continuando con la segunda fase, la *Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida (EICV)* tiene como objetivo evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida (ICV) de un sistema del producto para comprender mejor su importancia ambiental. Para lo cual requiere seleccionar y cuantificar los impactos para identificar así los puntos críticos. Para realizarlo, se requiere establecer las *Categorías de Impacto,* que son la clasificación que representa un asunto ambiental de acuerdo con el interés y en donde se categorizan los resultados del inventario de ciclo de vida (ICV).

Finalmente, se tiene la última fase, la *Interpretación del ciclo de vida* en la que, como su nombre indica, se interpretan los resultados obtenidos en el análisis del inventario y en la evaluación del impacto, para corroborar los datos e información utilizada y verificar su relación con el objetivo y el alcance definidos, y así llegar a conclusiones y recomendaciones finales.

Marco Geográfico

El área de estudio en donde se desarrolla el proyecto se ubica en el sur del departamento de Santander, en el municipio Puente Nacional. Algunos datos que permiten conocer el contexto de este municipio son, por ejemplo, que su cabecera municipal está situada a 1625 msnm, cuenta con una extensión de 248,39 km^2 y una temperatura media de 19 °C. En este territorio habita una población aproximada de 12476

habitantes de los cuales 6865, es decir más de la mitad, viven en la zona rural (Buitrago et al. 2016). Acerca de los datos ecológicos, se reporta por la Alcaldía, que Puente Nacional tiene entre sus ecosistemas el bosque primario y secundario con rastrojos, que a su vez se asocian o conectan con cuencas como Agua Blanca, Otero, Cantana y Suarez alto, medio o bajo. En cuanto al clima, este territorio goza de un clima privilegiado y una riqueza hídrica que tienen como reto potenciar y conservar, ya que este municipio está ubicado sobre la cuenca del río Suarez (Alcaldia Municipal Puente Nacional Santander 2018).

De acuerdo con lo anterior, cabe mencionar que el principal río que compone el municipio es el río Suarez, que pertenece a la gran cuenca del Magdalena y nace en el río Fúquene, cuenta con una altura de 3000 msnm y una extensión de 9823 km^2. Otra de las principales cuencas que tiene este municipio es la del río Cuchinero en los límites de los municipios de Bolívar, Sucre, Jesús María y Puente Nacional, y se crea a partir del río Ture y la Quebrada Botua (Rincón Gamba 2017).

Los municipios con los que limita Puente Nacional son Guatavita y Barbosa al norte, Moniquirá y Santa Sofía al oriente, Saboyá al sur y por el occidente con los municipios de Albania y Jesús María; además, cuenta con una distancia de 219 km a Bucaramanga y 157 km a Bogotá (Alcaldia Municipal Puente Nacional Santander 2018). En la siguiente figura, se presenta la ubicación geográfica de la zona de estudio, en la que se resalta la ubicación del pueblo y el de la vereda Bajo Guamitos.

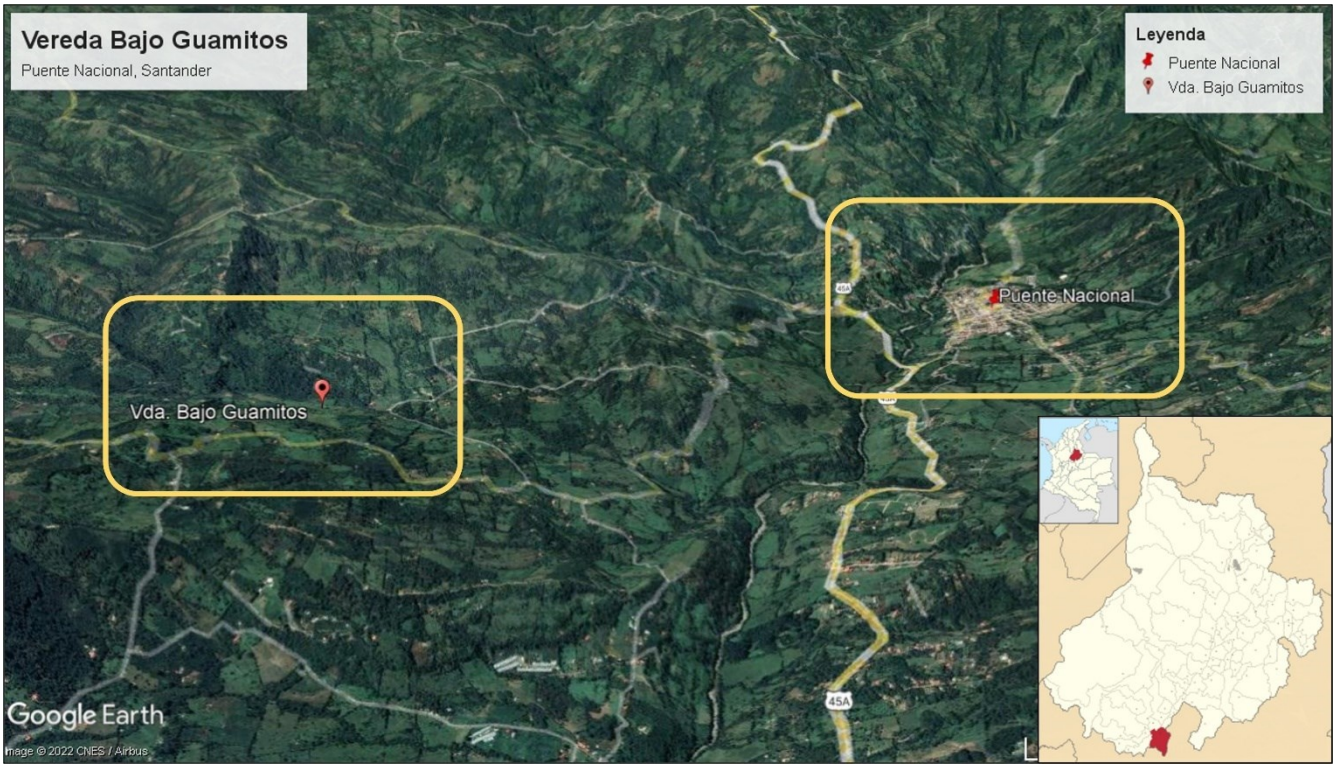

Figura 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio Puente Nacional, Santander. Tomada de Google Earth modificada con Rincón Gamba (2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, se resalta además la importancia que tienen el cultivo de café en este territorio y en el departamento en general, ya que Santander cuenta con un área cultivada de 954 ha y ocupa el séptimo lugar en cultivos de café a nivel nacional. Allí, la provincia de Vélez aporta el 10% de

área destinada para este cultivo y por último, Puente Nacional junto con los municipios de Barbosa y Guavatá son los que tienen mayor incidencia con esta actividad económica en esta región del país (Cámara de Comercio de Bucaramanga 2018; Puentes Rueda 2021).

Marco Normativo

En este apartado se encuentran las diferentes normas que guían y dan paso a los lineamientos del ACV de un proceso productivo, además de la normativa necesaria para evaluar posibles variables involucradas, consignadas en la siguiente tabla:

Tabla 3. *Normas que reglamentan y orientan el desarrollo del análisis de ciclo de vida.*

Ley	Descripción
ISO 14044 de 2006	La normativa que orienta el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), es la norma internacional ISO 14044. Las siglas ISO hacen referencia a la Organización Internacional de Normalización. Esta norma fue preparada por el Comité Técnico ISO/TC 207, Gestión ambiental, Subcomité SC 5, análisis del ciclo de vida (ISO, 14044 de 2006).
Decreto reglamentario 1077 de 2015	Expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio Decreto 1077 de 2015, con el objetivo de compilar y racionalizar las normas de carácter reglamentario que rigen en el sector y contar con un instrumento jurídico único para el mismo (Ministerio de Comercio Industria y Turismo 2015).
ISO 14040	Norma técnica NTC-ISO colombiana 14040, gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia (Organización Internacional de Normalización [ISO], 14040 de 2007).
Norma ISO 14042 del 2000	En la cual se describe y se establece una guía de la estructura general de la fase de Análisis del Impacto de Ciclo de Vida (AICV) (LCIA siglas en inglés). Se especifican los requerimientos para llevar a cabo un AICV y se relaciona con otras fases del ACV.
Norma ISO 14043 del 2001	Por la cual se dan los lineamientos básicos para realizar la Interpretación del ciclo de vida (2000). La interpretación es la fase de un ACV en la que se combinan los resultados de análisis del inventario con la evaluación de impacto.

Marco Institucional

Este apartado enlista a continuación, en la siguiente tabla las instituciones que interfieren directa e indirectamente en el desarrollo del presente proyecto de investigación:

Tabla 4. *Instituciones clave para el desarrollo del proyecto en cuestión.*

Entidades	Descripción

Universidad El Bosque	Institución de educación superior que otorga de sus clases, instalaciones (incluido los laboratorios), biblioteca, licencias de bases de datos para revisión bibliográfica y docentes necesarios para la realización de este proyecto. Institución de la que hace parte el director del presente documento, William Cortés de la Facultad de Química, quien ha orientado con empeño el desarrollo de este y quien hace parte además del grupo de investigación en Química Aplicada de la Universidad El Bosque con el enfoque de aprovechamiento de residuos agrícolas y agroindustriales.
Universidad Nacional de Colombia	Institución de educación superior que otorga el presupuesto requerido para la realización del proyecto, a partir de la convocatoria "*Apoyo a Proyectos de Investigación, Creación Artística e Innovación de la Sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia - 2020*". El codirector, Carlos Guerrero de la Facultad de Química de esta institución, ha orientado con empeño el desarrollo de este proyecto y quien hace parte del grupo de investigación Aprovechamiento Energético de Recursos Naturales con el enfoque de aprovechamiento de residuos agrícolas y agroindustriales.
Organización Internacional de Normalización ISO	Es una organización internacional no gubernamental e independiente. Tiene una membresía de 165 organismos nacionales de normalización con expertos que comparten conocimientos y desarrollan Normas Internacionales voluntarias, basadas en consenso y relevantes para el mercado, que respaldan la innovación y brindan soluciones a los desafíos globales (ISO, 14044 de 2006).
Alcaldía Municipal Puente Nacional Santander	Institución gubernamental que cuenta con la información básica del municipio para construir el contexto geográfico de la zona de estudio.

Metodología

En este apartado se presenta inicialmente una descripción del tipo de investigación realizada, además del alcance y objetivo del Análisis de Ciclo de Vida para la obtención de furfural a partir de biomasa residual de cultivo de café. Esto último, permite tener claros los límites para cada una de las etapas del proceso y por ende mayor claridad en los resultados esperados para cada objetivo. Por último, se presenta la metodología desarrollada para cada objetivo específico, en el que se detallan las técnicas e instrumentos requeridos para lograr alcanzarlos con éxito.

Tipo de investigación

Esta es una investigación de tipo descriptiva, en la que se desglosa y analiza cada una de las etapas del proceso de obtención de furfural propuesto a escala de laboratorio, con el fin de conocer con mayor claridad los impactos generados y sus posibles causas. En cuanto a los enfoques de la investigación, esta es de tipo mixto, ya que, al requerir de la recolección y cuantificación de datos de entrada y salida en cada etapa, se tiene un enfoque cuantitativo; y al realizar una interpretación de los datos para la evaluación de los impactos encontrados, se tiene un enfoque cualitativo.

Alcance y objetivo del ACV

La norma NTC - ISO 14044, la cual se toma como guía principal para este ACV, presenta ocho fases para su desarrollo. Sin embargo, para el caso específico de este ACV se tomaron únicamente las cuatro primeras fases que son, la definición del objetivo y alcance, el análisis del inventario de ciclo de vida, la evaluación del impacto y la interpretación de los resultados (ISO, 14044 de 2006).

Metodología para objetivo específico 1

Este primer objetivo busca *identificar las variables involucradas en el proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual del cultivo de café, con el fin de obtener el Inventario de Ciclo de Vida (ICV).* Para su desarrollo fue necesario tener claridad del alcance presentado anteriormente, en el que se encuentran los límites del sistema y la Unidad Funcional (UF). La primera fase de definir objetivo y alcance, son el plan inicial para el desarrollo del ICV. Luego de esto, se inició con la recopilación de datos cualitativos y cuantitativos para cada proceso unitario, datos que fueron medidos, calculados o estimados según fue el caso y, por último, se realizaron las siguientes actividades específicas:

1. Elaboración de los diagramas de flujo, uno general y diagramas específicos a cada etapa, para desglosar e identificar detalladamente las variables de entrada y de salida del proceso.
2. Estructuración de la matriz del ICV, en el que se registran las entradas y salidas teniendo en cuenta el balance de masa y energía, su importancia ambiental y la UF.

La técnica usada para este primer objetivo fue el análisis documental, a partir de la bibliografía hallada en bases de datos que comparte similitud con el presente ACV y del cual se toman referencias importantes en cuanto al desarrollo del ICV. Se realizó también una entrevista a los campesinos que cultivan el café para conocer el contexto y extraer datos tanto cualitativos como cuantitativos de acuerdo con el alcance.

Metodología para objetivo específico 2

Se quiere para este objetivo *evaluar los impactos ambientales generados en la transformación de biomasa residual de cultivo de café a furfural, asociando los resultados del ICV a los impactos ambientales, y así obtener el perfil ambiental del proceso*. Para lograrlo, de acuerdo con la ISO utilizada, se establecieron las categorías de impacto de acuerdo con las variables identificadas en el ICV.

En este proyecto se utilizó el método Ecoindicador 99 (EI99), útil para la cuantificación de impactos ambientales que establece el daño en tres aspectos, la salud humana, la calidad de los ecosistemas y el uso de los recursos. El resultado para la cuantificación se da en milipuntos (mPt), donde 1 Pt representa una centésima parte de la carga ambiental (Ilari et al. 2020; Rojas Zerpa 2018; Verbitsky and Pushkar 2018). Teniendo esto en cuenta, las actividades realizadas son:

1. Asignación de variables identificadas del ICV a las categorías de impacto ya establecidas.
2. Cuantificación de los resultados del ICV.
3. Conversión de las unidades del ICV a la UF.
4. Conocimiento del impacto final a partir de calcular los resultados de los indicadores de categoría.

Para el caso propio de este proyecto, no se tendrán indicadores de categoría numéricos, ya que no se tiene un estimado de salidas generadas. Se tendrá, por tanto, la mención de las salidas generadas y los impactos que éstas pueden generar.

Metodología para objetivo específico 3

Para alcanzar el objetivo general, se tiene como último objetivo específico *interpretar los resultados del inventario y evaluación del ciclo de vida, a partir del análisis de integridad, sensibilidad y coherencia, con el fin de establecer la viabilidad de obtención de furfural a partir de la biomasa residual de cultivo de café.* Estos análisis orientados por la ISO pretenden verificar la veracidad de la información usada para lograr una conclusión confiable en cuanto a la viabilidad ambiental de la metodología propuesta.

En el primer análisis, de **integridad**, se comprueba que la información y los datos utilizados del ICV y EICV (Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida) son los necesarios. Este busca dar mayor confianza para iniciar la interpretación de los resultados. Al identificar vacíos e inconsistencias en el proceso, se realiza una lista de los parámetros del ICV que son requeridos (materiales, recursos energéticos e indicadores) (ISO, 14044 de 2006).

El análisis de **sensibilidad** confirma la confiabilidad de los resultados y conclusiones, además de incluir las sugerencias y posibles cambios del proceso para minimizar el impacto, ya que se determina también, la importancia de cada impacto y su influencia en el proceso (ISO, 14044 de 2006).

Por último, en el análisis de **coherencia** se comprueba que las hipótesis, métodos y datos utilizados son coherentes con el objetivo y alcance del ACV (ISO, 14044 de 2006).

Aspectos éticos

En este apartado, se menciona lo relacionado a las fuentes de información utilizadas y su veracidad, afirmando con ello, que no se utilizó plagio en el desarrollo de la presente investigación. Los detalles de las fuentes de información utilizadas se presentan en la fase de interpretación de resultados, y allí se corrobora la veracidad y eficiencia de los datos utilizados durante la elaboración del inventario de ciclo de vida y el de la evaluación de los impactos ambientales del ACV.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, la autora de la presente investigación hace aclaración que el desarrollo del ACV carece de plagio en cualquiera de sus clasificaciones: intencionado, no consciente o ciberplagio (ULPGC 2022). Una de las maneras de garantizarlo fue utilizar el gestor de referencias, Mendeley por el cual se tuvo seguimiento y almacenamiento de las fuentes utilizadas para cada etapa del proyecto.

Resultados, análisis y discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos específicos, junto con su análisis y discusión. Para ello, se tiene en cuenta que, del primer objetivo específico se obtiene el *Inventario de ciclo de vida*, en el segundo la *Evaluación de los impactos ambientales identificados* y en el tercero, la *Interpretación de los resultados obtenidos*. Por último, en este apartado se presenta la viabilidad obtenida para la metodología de obtención de furfural a partir de biomasa residual de cultivo de café propuesta desde la investigación.

Previo a la presentación de los resultados, es necesario aclarar que el ACV desarrollado en el presente documento es el denominado "*simplificado*". De acuerdo con la bibliografía, existen tres maneras de desarrollar un ACV, la primera y más sencilla, es la *conceptual* en la que el estudio es básicamente cualitativo y se identifican los impactos potenciales más significativos utilizando datos genéricos. La segunda manera de desarrollar el ACV es la *simplificada*, en el que hay mayor complejidad al utilizar datos cualitativos y cuantitativos, pero que siguen siendo genéricos además de selectivos, ya que se seleccionan las etapas más relevantes para conformar los procesos unitarios. Por último, el ACV se puede desarrollar de manera *completa,* siendo esta la de mayor nivel de complejidad, porque su análisis es detallado en todas las fases del ACV y cuenta con la mayor cantidad de datos cuantitativos y cualitativos (Bautista Rodríguez, Toloza Blanco, and Sanes Orrego 2019; Eurofins 2021b; Haya Leiva 2016; TECPA 2022).

De acuerdo con lo anterior, se presenta el ACV simplificado, ya que se seleccionaron las 7 etapas más relevantes en el proceso de obtención de furfural y porque se tienen datos cuantitativos y cualitativos. Además de ello, el proceso analizado es a escala de laboratorio, es decir en un ambiente controlado.

De acuerdo con lo mencionado en la metodología, la ISO 14044 tiene como primera fase del ACV la definición del objetivo y alcance del proyecto, los cuales deben estar establecidos antes de presentar los demás resultados, ya que permite limitar los resultados de los objetivos específicos y excluir aquellos procesos que no se tomaron en esta investigación.

Teniendo esto en cuenta, el *objetivo* del ACV es desarrollar el Análisis de Ciclo de Vida del proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual del cultivo de café, a través de la inclusión de las variables involucradas en la transformación, con el fin de evaluar los impactos ambientales que se generan. Y el *alcance* que permite definir el límite del sistema, va desde la obtención de biomasa residual en el cultivo de café, a la obtención de la sustancia química, lo cual se describe como "de la cuna a la puerta" (ISO, 14044 de 2006).

Esto significa que, en la presente investigación no se incluye el proceso de cultivo de café ni los implementos utilizados en ello: siembra, recogida y almacenamiento del residuo orgánico en la finca. Tampoco se incluyen las etapas de uso y disposición final del furfural, ya que como se ha mencionado, su fin es investigativo y no comercial. Los bienes capitales que tampoco se incluyeron, fueron las instalaciones de la finca, elementos usados para almacenamiento del residuo (manguera, pala de barrido y cantidad de agua usada en descerezado), las instalaciones de los laboratorios y los implementos manuales utilizados. Esto, debido a que se buscó conocer el impacto generado por el proceso neto de obtención de furfural.

Por ello, el alcance mencionado comprende específicamente el transporte de ida y regreso de Bogotá a la vereda Bajo Guamito en Puente Nacional Santander, la recolección de la biomasa en la finca cafetera, el pretratamiento físico y la transformación a furfural en los laboratorios de la Universidad El Bosque.

Continuando con los lineamientos de la norma, el ACV requiere tener una Unidad Funcional (UF) definida, es decir, una unidad de referencia para el producto analizado. Para este caso entonces, la UF es 1,0 mL de furfural porque, lo que se busca en la metodología es conocer cuánto furfural se obtiene por cada 5,0 g de biomasa residual.

Inventario de Ciclo de Vida (ICV)

Para construir adecuadamente el ICV, fue necesario realizar diagramas de flujo que permitieron visualizar con mayor claridad las entradas y salidas respecto a masa y energía en cada proceso unitario para la obtención de furfural, a partir de biomasa residual de café. Con base en los diagramas, se obtuvo al final el ICV con información detallada de las entradas y salidas, como las cantidades y unidades de medida respecto a la unidad funcional seleccionada, la cual es de 1,0 mL de furfural.

A continuación, se presenta el diagrama general con las siete etapas principales del proceso de obtención de furfural, numeradas y diferenciadas con color azul (*al igual que los diagramas siguientes*), en las que se presentan algunas de las características relevantes que serán descritas con más detalle en los siguientes diagramas de flujo.

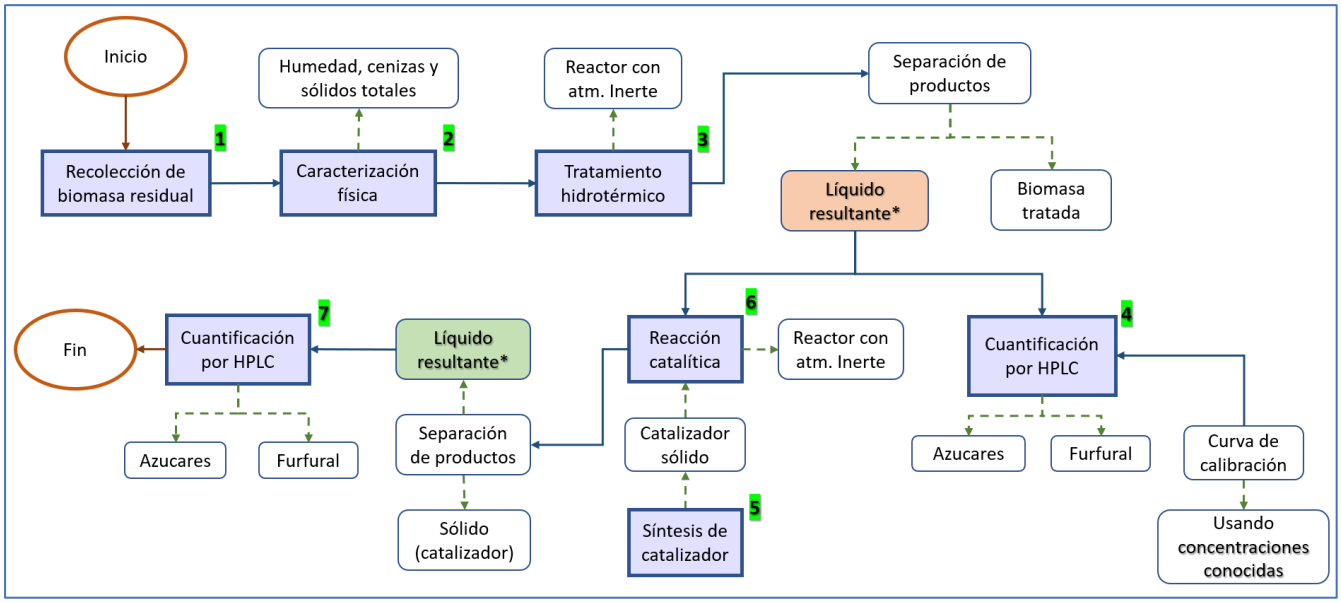

Figura 2. Etapas principales del proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual de cultivo de café.

Las siete etapas implementadas para la obtención de furfural a partir de biomasa residual de café son: recolección de biomasa residual de cultivo de café, caracterización física de las muestras obtenidas, tratamiento hidrotérmico del cual resulta la primera muestra relevante del proceso, ya que se utiliza para realizar la primera cuantificación de furfural sin uso de catalizadores.

Con las siguientes etapas, se buscó identificar la influencia que un catalizador puede generar al proceso de obtención de furfural. Para lo cual se realizó la síntesis de catalizador en la etapa 5, un proceso desarrollado para esta investigación, del cual se obtuvo el catalizador utilizado en la etapa 6 junto con el líquido resultante del tratamiento hidrotérmico. Por último, se cuantificó nuevamente la concentración de furfural y xilosa para conocer el rendimiento final del proceso.

Teniendo en cuenta la descripción general del proceso, a continuación, se presenta una descripción detallada para cada una de las etapas principales del proceso.

El siguiente diagrama representa la etapa 1, en la que se realizó la *recolección de la biomasa residual* en la finca ubicada en la vereda Bajo Guamito del municipio Puente Nacional, del departamento de

Santander. Luego de la recolección, fue necesario hacer el almacenamiento y caracterización física de las muestras en el menor tiempo posible para no perder sus propiedades iniciales, lo cual se realizó en los laboratorios de la Universidad El Bosque (*figura 3*).

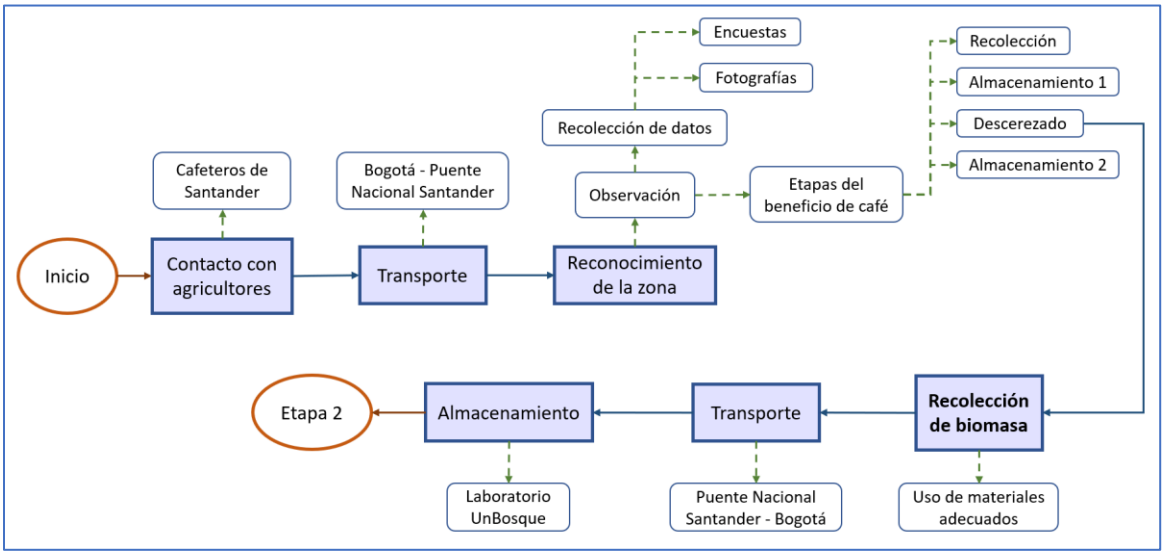

Figura 3. Recolección de la biomasa residual en Puente Nacional, Santander.

La etapa 2 que se presenta en la *figura 4*, muestra en detalle el *primer tratamiento* que recibieron las muestras obtenidas. Este fue guiado por la norma ASTM E 1757-01, de allí se obtuvo la muestra homogenizada a partir de la pulverización, lo cual facilitó la determinación de los porcentajes de humedad, sólidos totales y cenizas, orientados por las normas mencionadas en la figura.

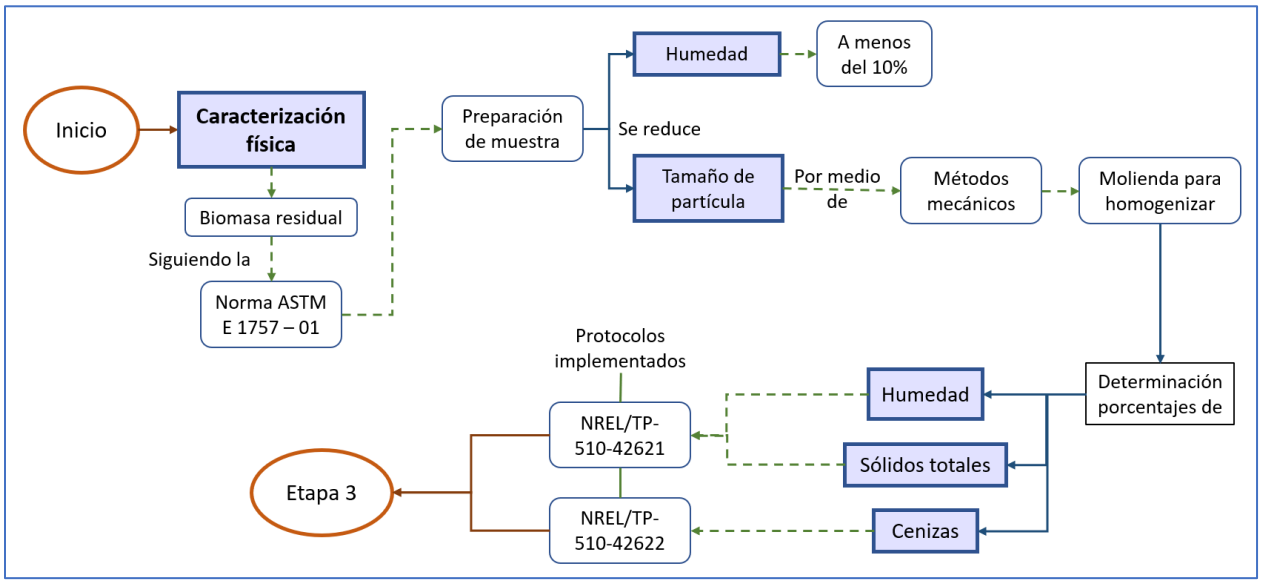

Figura 4. Caracterización física de la biomasa residual de cultivo de café.

Continuando, en la etapa 3 se refleja el *tratamiento hidrotérmico* aplicado a las muestras preparadas (*figura 5*). Para esto se utilizó un reactor discontinuo de atmósfera inerte, el cual se conoce también como un reactor químicamente inactivo, en el que se elimina el riesgo de contaminación por gases reactivos

existentes en el aire, como el oxígeno y el dióxido de carbono, así que, el aire fue desplazado y se utilizó nitrógeno como medio de reacción (Renishaw plc 2022). En este aspecto, se planteó un diseño factorial dos a la dos en el que variaron los parámetros de temperatura y tiempo con un mínimo y un máximo, fue así como se obtuvieron los líquidos resultantes (recuadro color rojo) para cada uno, los cuales fueron utilizados en las etapas 4 y 6, de las figuras 7 y 9 respectivamente. Este tratamiento permite romper la hemicelulosa presente en la biomasa para obtener xilosa, la cual es precursora del furfural.

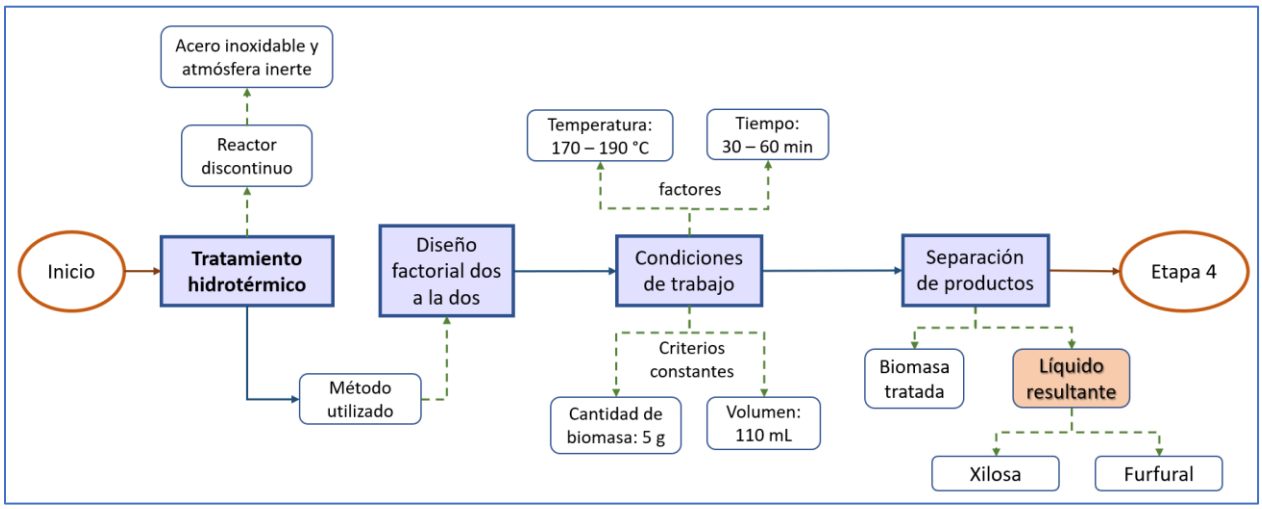

Figura 5. Tratamiento hidrotérmico.

Después del tratamiento hidrotérmico, el siguiente paso es conocer la cantidad de xilosa y furfural empleando la cromatografía líquida de alta eficiencia como técnica de cuantificación. Así, se destaca que la cromatografía líquida es una herramienta de gran importancia en la química analítica para separar, identificar y cuantificar los compuestos presentes en cualquier muestra que se pueda disolver en un líquido (Waters 2022). Lo anterior se realizó luego del tratamiento hidrotérmico y luego de la reacción catalítica.

Este método requiere hacer una *curva de calibración* antes de la cuantificación de sustancias (figura 6) porque permite conocer la relación que existe entre el área y la concentración para xilosa y para furfural, utilizando concentraciones conocidas y un patrón interno para cada uno. La información arrojada por la curva permitió interpretar los resultados de la cuantificación de las muestras que, de acuerdo con el diagrama general se realizaron en las etapas 4 y 7, esta última, con presencia del catalizador.

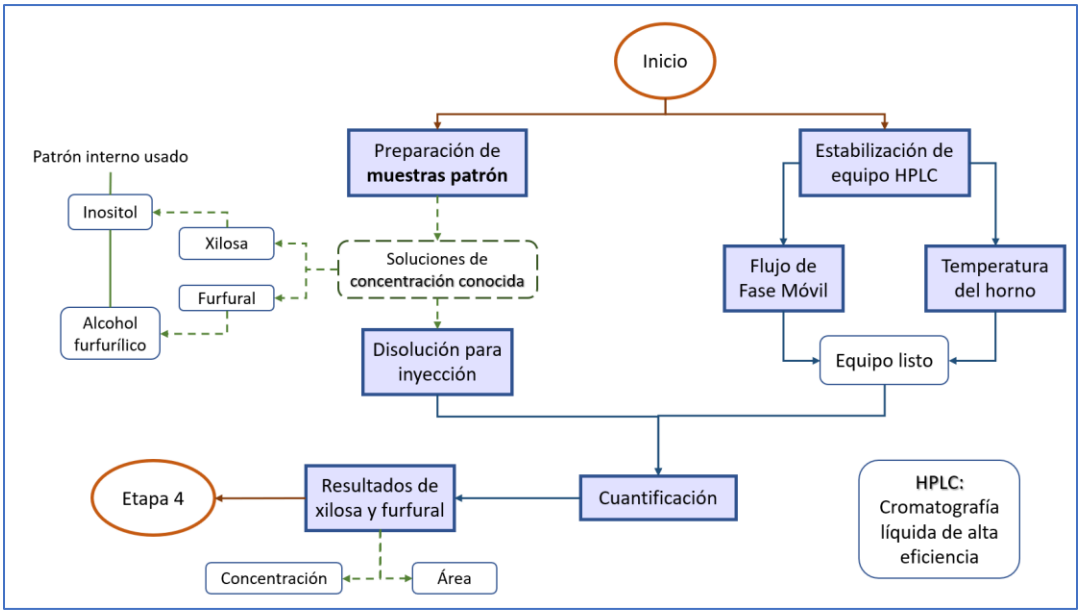

Figura 6. Curva de calibración a partir de la cuantificación por HPLC de xilosa y furfural utilizando concentraciones conocidas.

En la figura 7 se observa que el procedimiento para cuantificación fue en su mayoría igual al de la curva de calibración, a excepción que se utilizaron los líquidos resultantes del tratamiento hidrotérmico.

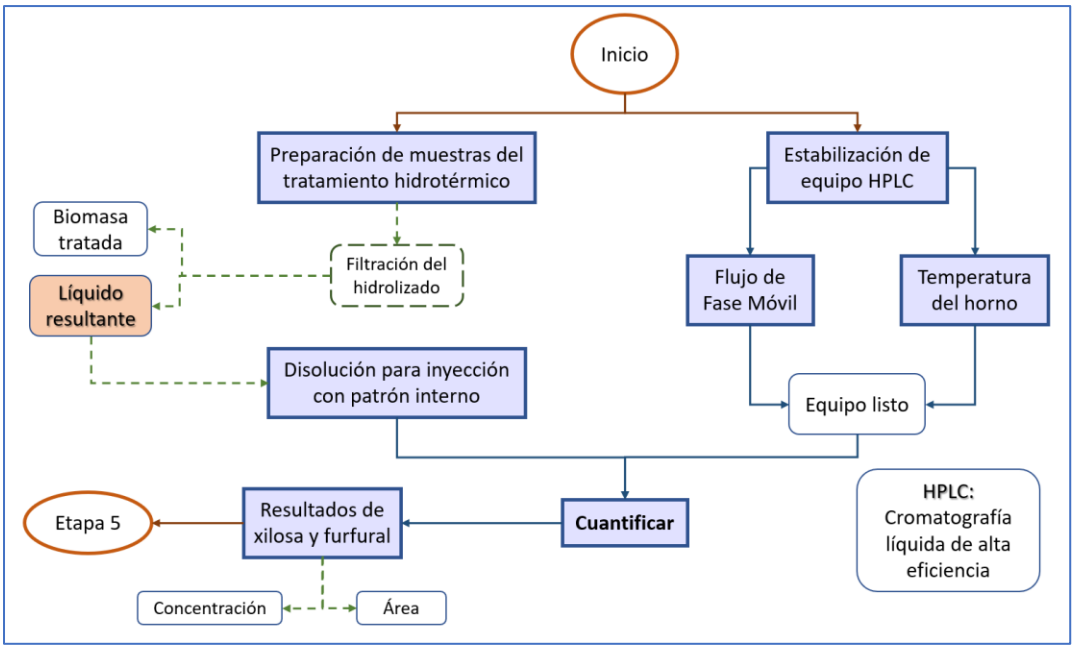

Figura 7. Cuantificación de xilosa y furfural por HPLC utilizando la muestra resultante del tratamiento hidrotérmico.

El siguiente paso fue realizar la *síntesis de catalizador* (etapa 5) realizada para la reacción catalítica de la que se busca obtener mayor rendimiento de furfural en comparación con el tratamiento hidrotérmico que únicamente utiliza agua. Se presenta en la figura 8 el paso a paso de la síntesis y las condiciones empleadas por los investigadores.

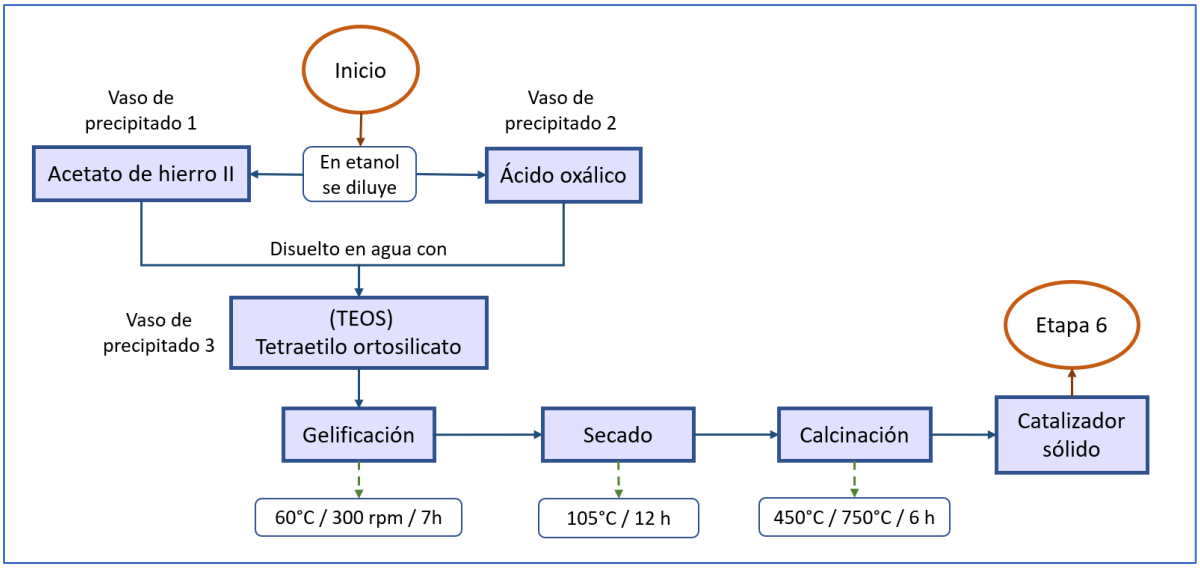

Figura 8. Síntesis de catalizador.

Como se observa a continuación en la figura 9, el catalizador obtenido, compuesto básicamente por hierro, silicio y oxígeno, se hizo reaccionar con el líquido resultante del tratamiento hidrotérmico, con el objetivo de favorecer la reacción y obtener así el producto de interés, furfural.

En esta reacción, como se observa, se utilizó nuevamente el reactor de atmósfera inerte a una temperatura de 170 °C y 2 horas de reacción, para obtener la segunda muestra de interés, denominada en la figura como "líquido resultante" en color verde, de la cual se realizará la cuantificación final.

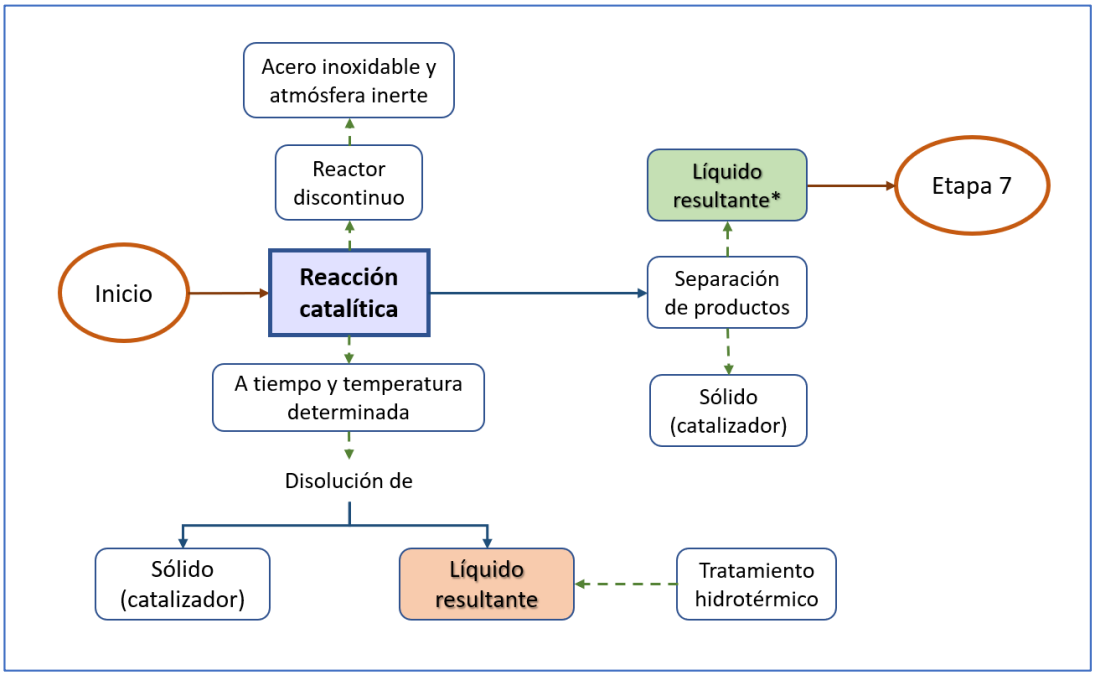

Figura 9. *Reacción catalítica.*

Por último, se presenta la etapa 7 en la que se *cuantifica la cantidad de xilosa y furfural* que se encuentra en la muestra final (color verde de las figuras 9 y 10), para continuar con la comparación de resultados y la obtención del rendimiento real de furfural presente en la biomasa estudiada, que como se observó en la figura 7, corresponde a 5,0 gramos.

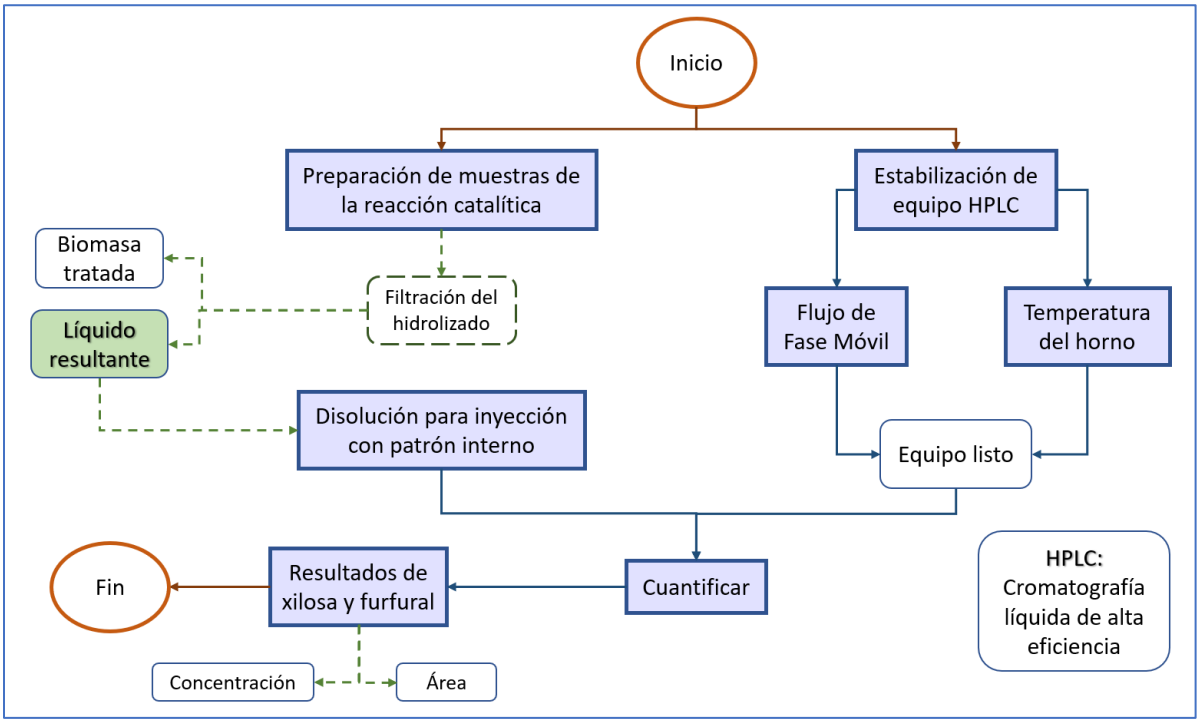

Figura 10. Cuantificación de xilosa y furfural por HPLC de la muestra producto de la reacción catalítica.

Finalizados los diagramas de flujo, se muestran a continuación los mg de furfural por cada g de biomasa que se obtuvieron de las etapas 4 y 7.

En el tratamiento hidrotérmico se observó que se obtiene mayor cantidad de furfural empleando la temperatura y tiempo más altas (190 °C y 1 hora). Para el caso de la reacción catalítica, las condiciones de temperatura y tiempo (170 °C, 2 horas) y las cantidades de hidrolizado (100 mL) y catalizador (100 mg) se mantuvieron constantes en las cuatro ocasiones, ya que se buscó conocer la influencia del catalizador en cada hidrolizado.

Tabla 5. *Resultados obtenidos del diseño factorial dos a la dos implementado en las etapas de tratamiento hidrotérmico y reacción catalítica.*

Etapas	Tratamientos	mg furfural/g biomasa
Tratamiento hidrotérmico	H1 170 °C, 30 min	2,02118
	H2 190 °C, 30 min	4,92243
	H3 170 °C, 60 min	2,97222
	H4	**6,20014**

	190 °C, 60 min	
Reacción catalítica -RC-	RC-H1	5,04990
	RC-H2	**5,98421**
	RC-H3	**5,98012**
	RC-H4	5,45696

De la tabla 5, cabe resaltar que en los resultados obtenidos del tratamiento hidrotérmico sí se evidencia la influencia de la temperatura y el tiempo para la obtención de furfural, a diferencia de los resultados obtenidos de la reacción catalítica que tienen diferencias mínimas. De estos resultados se puede concluir que utilizar agua a ciertas condiciones de temperatura, tiempo y presión (con el uso de reactor), generan que esta actúe en sí misma como un catalizador en el hidrolizado. No obstante, la tabla también permite concluir que el uso del catalizador favorece la obtención de furfural a partir de la biomasa residual de cultivo de café.

A continuación, se presentan algunas de las fotografías tomadas durante todo el proceso realizado:

Figura 11. Fotografías tomadas durante la recolección de la biomasa residual y el tratamiento físico.

Se observa en la figura 13, el proceso de recolección de la biomasa en la finca cafetera. Las muestras se almacenaron en bolsas ziploc, a las cuales se les extrajo manualmente el aire para conservar la muestra en el trayecto de regreso. Estas bolsas se guardaron en la nevera de icopor, acondicionada con hielo para evitar la descomposición de las muestras. Luego se observan las siguientes seis imágenes que muestran

algunos de los procesos realizados para la determinación de cenizas y humedad, además del proceso de molienda para obtener una muestra uniforme.

Figura 12. Fotografías tomadas en el proceso químico que comprende las demás etapas del ACV.

En la figura 14, se observan algunos de los equipos usados para el proceso, que además fueron de gran importancia. Se encuentra, por ejemplo, el reactor de atmósfera inerte (*costado superior derecho*) que, además de las descripciones dadas anteriormente en los diagramas de flujo, fue hecho especialmente para esta investigación. Otros de los equipos que se observan en la imagen, son la descerezadora (también llamada despulpadora), la balanza y el HPLC.

Terminada la descripción de este proceso metodológico se presenta a continuación el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) que se obtuvo como resultado de describir cada etapa del proceso de obtención de furfural, y conocer así sus insumos utilizados y energía consumida, entre otros. Lo anterior, siguiendo las indicaciones de la ISO 14044 pero también, tomando como guía en la bibliografía el ACV realizado al proceso productivo de biorrefinerías de las cuales se obtienen productos de interés para la industria química como el ácido glucárico, levulínico o, como sustancia secundaria el furfural (Kapanji et al. 2021).

La anterior referencia, es una de las que más se asemeja a la presente investigación, ya que se realiza un ACV en sus principales etapas, y se adjuntan allí los anexos que detallan el proceso de recolección de datos para la formulación del ICV. Continuando con la mención de los recursos de apoyo que se utilizaron para el desarrollo de este ACV, se tiene también el proyecto de grado realizado por Juan José Pinzón, egresado de la Universidad El Bosque, quien realizó el ACV para la elaboración del queso tipo cuajada (Pinzón Rodríguez 2018, 2020).

A partir de lo mencionado anteriormente, cabe recordar lo dicho a lo largo del documento, esta investigación es innovadora y diferencial respecto a la bibliografía encontrada de Análisis de Ciclo de Vida, ya que se desarrolla en un proceso experimental a escala de laboratorio, a diferencia de la mayoría de investigaciones que se hacen en el marco de un proceso productivo dentro de una micro o macro empresa, o industrias que requieren de un ACV de mayor detalle, o también llamado "completo", en los que se requiere hacer estudio de costos que garanticen mejoras en el rendimiento, productividad y reducción de impactos ambientales para cumplimientos normativos. Es por ello, que el desarrollo de este ACV es también denominado "simplificado" (Bautista Rodríguez et al. 2019).

Teniendo en cuenta lo anterior, y como resultado de extensos cálculos para conocer los flujos de masa y energía correspondientes al presente ACV, se obtuvo la siguiente tabla, que corresponde al Inventario de Ciclo de Vida para la obtención de furfural a partir de biomasa residual de cultivo de café.

Tabla 6. *Inventario de Ciclo de Vida del proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual del cultivo de café.*

Proceso Unitario	Insumo	Cantidad	Unidad	Unidad Funcional (g)	Cantidad respecto a UF	Unidad	Observaciones / Referencias
Materias primas							
Tratamiento hidrotérmico	Biomasa residual	20,00	g	1,2	24,00	g/g de Furfural	Después del tratamiento físico, se utilizaron 5 g para cada hidrolizado.
Síntesis y tratamiento hidrotérmico	Agua H_2O destilada	414,25	g		497,10		Se obtiene de empresas del sector químico. (Densidad 0,998 g/cm3)
Síntesis de catalizador Cantidad preparada: 3,0 g	Acetato de Hierro II $C_4H_6O_4Fe$	0,39	g		0,47		Cantidades necesarias para preparar 3,0 g de catalizador. Se utilizaron las densidades para los que se adquirieron en estado líquido.
	Tetraetilo ortosilicato (TEOS) $Si(OC_2H_5)_4$	47,16	g		56,60		
	Ácido oxálico $H_2C_2O_4$	24,94	g		29,92		
	Etanol C_2H_6O	9,47	g		11,36		
Curva de calibración y cuantificaciones HPLC	Acetonitrilo CH_3CN	214,34	g		257,21		Cantidades requeridas para el total de las inyecciones hechas en curva de calibración y cuantificaciones de las etapas 4 y 7 (figura 4) *(1) Agua utilizada para tratamientos en HPLC (Merck KGaA, 2022).*
	Agua H_2O (1)	141,30	g		169,56		
	Inositol $C_6H_{12}O_6$	0,20	g		0,24		
	Xilosa	0,20	g		0,24		
	Alcohol furfurílico $C_5H_6O_2$ (98%)	0,05	g		0,06		

	Furfural $C_5H_4O_2$ (99%)	0,05	g		0,06		
Reacción catalítica	Catalizador H13 (2)	0,40	g		0,48		Cantidad total utilizada en las 4 reacciones hechas. (2) ***"H13"*** nombre dado al catalizador seleccionado de la síntesis.
Recolección de biomasa residual	Gasolina	40882,00	g		49058,40		Comprende recorrido ida y regreso de la Universidad El Bosque a la finca cafetera. Densidad: 720 kg/m3, (Zoilo Ríos, 2020).
Energía							
Recolección de biomasa residual	Km recorridos	356,00	Km	1,2	427,20	km/g de Furfural	Comprende recorrido ida y regreso de la Universidad El Bosque a la finca cafetera.
	Descerezadora (motor)	0,18	kWh		0,22	kWh/g de Furfural	Energía estimada a partir de los caballos de fuerza de una similar (JOTAGALLO, 2022).
Caracterización física de biomasa y síntesis de catalizador	Estufa de calentamiento (3)	57,60	kWh		69,12		Información tomada de la ficha técnica solicitada en el laboratorio.
	Mufla	74,40	kWh		89,28		Energía estimada en internet por de la referencia del equipo (SCI FINETECH, 2013).
Cuantificación	HPLC	6,30	kWh		7,56		Energía estimada a partir de los datos del equipo.
Tratamiento hidrotérmico y reacción catalítica	Reactor de atmosfera inerte	9,20	kWh		11,04		Energía total a partir de las partes del reactor *(Anexo de cálculos)*

Justificación de los datos obtenidos

Los datos recolectados y que se observan en la tabla 6 fueron calculados, estimados o hallados según fue el caso, y como se puede observar, las unidades se convirtieron o unificaron en unidades de masa y energía en su mayoría, para lo cual se realizaron los cálculos necesarios utilizando la densidad de algunas de las sustancias químicas. Como excepción se tienen los kilómetros recorridos para la etapa de recolección de biomasa residual de café.

Los cálculos realizados, se pueden consultar en detalle en el Anexo 1, de los cuales se obtuvo los cuadros resumen que facilitan el análisis y comprensión en cuanto a energía consumida al final del proceso

experimental de laboratorio y los costos que ello representó. Análisis que será profundizado en la siguiente fase del ACV, la evaluación de los impactos ambientales.

En cuanto al ICV, es necesario recordar que los materiales y equipos que allí se listan son los que entran en el alcance establecido para la presente investigación, en el cual también se definieron los límites del sistema y aquellos procesos que no entran en el ACV ya que se salen de los intereses para los cuales se realiza este proyecto de grado. Teniendo en cuenta lo anterior, se mencionan a continuación las fuentes de los datos para el ICV.

Para la etapa de recolección de la biomasa residual, la información acerca del método de recolección, el tiempo estimado y el transporte (distancia recorrida, gasolina consumida y costos), fue tomada directamente en el lugar, por lo que fue información primaria.

Los investigadores Kevin René Suárez Suárez, estudiante de posgrado de la Universidad Nacional, el profesor Carlos Alberto Guerrero Fajardo, docente de la Universidad Nacional y William Giovanni Cortés Ortiz, docente guía y acompañante del proceso fueron la fuente principal para conocer en detalle el proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual de cultivo de café, en cuanto a las cantidades de insumos utilizadas, los tiempos y temperaturas empleados, además de los resultados del proceso experimental y los demás detalles del proceso químico. Ellos a su vez, tomaron diferentes fuentes bibliográficas para establecer las cantidades y condiciones a utilizar en todos los ensayos realizados, incluidas las normas técnicas mencionadas en los diagramas de flujo.

Para el caso de la energía consumida, se estimaron los principales equipos de gran importancia para las etapas de, obtención de la biomasa en la finca, síntesis del catalizador, tratamiento hidrotérmico, reacción catalítica y sus respectivas cuantificaciones. Los equipos estimados fueron: la despulpadora de café, estufa de calentamiento, mufla, HPLC y los que conforman el reactor de atmosfera inerte, es decir la plancha de agitación, pirómetro y resistencia. El último equipo que se incluyó fue un evaporador rotatorio, útil para la purificación de la cantidad de furfural que se obtuvo al final. Sin embargo, este último no fue un proceso realizado en laboratorio, fue tan solo un estimado para conocer la relación de costos, ya que en el mercado el furfural se comercializa con un alto porcentaje de pureza.

El cálculo para hallar la energía consumida por estos equipos en kWh fue multiplicar los watts consumidos por el tiempo en horas que se utilizó en laboratorio. Para obtener esa potencia, se utilizaron tres fuentes: la primera fue por observación directa en los equipos, ya que algunos de ellos como el HPLC y el reactor tienen una placa metálica o cinta de papel adherida con la información útil como los amperios y voltios para calcular la potencia.

La segunda fuente de datos fueron las fichas técnicas que otorgó el personal de laboratorio, esto para el caso de la estufa de calentamiento y el pirómetro. Por último, la tercera fuente fue de tipo secundaria, ya que se consultó en fuentes bibliográficas, método utilizado para la plancha de agitación y la descerezadora, entre otros (las referencias de las fuentes se encuentran con mayor detalle en el Análisis de integridad).

En cuanto a los costos invertidos, se tomaron como fuente principal, las facturas digitales en las que se detalla la cantidad y costo correspondiente para cada insumo químico, en especial los utilizados en las etapas de síntesis de catalizador y cuantificación por HPLC. Aquellos datos que no se registraron allí,

como el caso del agua destilada, se consultaron en la bibliografía (en los anexos del presente documento se encuentran dichas facturas). Como se detalló en los límites del sistema, no se incluyeron los costos de equipos utilizados ni los implementos secundarios, como probetas, crisoles, papel filtro, embudo, micropipetas, viales de almacenamiento de muestras, entre otros.

A partir de lo presentado anteriormente, a continuación, inicia la tercera fase de este ACV, la evaluación de los impactos ambientales, fase en la que, además, se detallan el análisis y la discusión de los costos.

Evaluación de los impactos ambientales identificados en el ICV

De acuerdo con la ISO 14040 y 14044, esta fase llamada *Evaluación de Impactos de Ciclo de Vida* EICV, se diferencia de otros métodos de evaluación de impactos ambientales porque mide o estima los *impactos potenciales* que se derivan del proceso seleccionado y tiene un enfoque relativo, ya que depende del alcance propio de cada ACV y los límites del sistema seleccionados (ISO, 14044 de 2006).

Teniendo en cuenta lo anterior, y por medio de la búsqueda bibliográfica, en esta fase se analizan y discuten los resultados obtenidos en el ICV, identificando los impactos ambientales potenciales en cada etapa del proceso para conocer así, la viabilidad de implementar esta metodología de obtención de furfural a partir de biomasa residual del cultivo de café.

Para iniciar esta fase, la ISO menciona como paso obligatorio establecer las categorías de impacto referentes al ACV en cuestión, lo cual requiere previamente conocer la metodología a utilizar en la EICV. Acerca de las metodologías del EICV, existe una gran variedad que se selecciona de acuerdo con el ACV analizado, cada metodología selecciona diferentes categorías de impactos y a su vez, le dan una importancia ambiental diferente. Esto dificulta aún más conocer el impacto real del proceso o producto estudiado ya que los resultados obtenidos se ven fuertemente influenciados por la metodología seleccionada (Verbitsky and Pushkar 2018).

En este ACV, se seleccionó la metodología del Ecoindicador 99 (EI99), la cual es una herramienta que se enfoca en el punto final, también llamado End Point. Este enfoque quiere decir, que se evalúa el daño ambiental desde tres aspectos, la salud humana, la calidad de los ecosistemas y el uso de los recursos. Además de utilizar el método EI99, el análisis y discusión del presente ACV se realiza desde un enfoque ambiental, es decir que se habla de las afectaciones en el área ecológica, social y económica, ya que es a partir de estas tres áreas que se garantiza la viabilidad de implementar la propuesta metodológica.

Categorías de impacto

De acuerdo con Harrar de Dienes & Gómez Navarro (2008), Muller Nigri et al. (2014) y Pinzón Rodríguez (2018), el método EI99 tiene las siguientes categorías de impacto: cambio climático, disminución de la capa de ozono, efectos cancerígenos, respiración de partículas inorgánicas, respiración de partículas orgánicas, radiación ionizante, ecotoxicidad, acidificación/eutrofización, uso del suelo, uso de minerales y agotamiento de combustibles fósiles. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el análisis se centrará en los tres aspectos del EI99: la salud humana, la calidad de los ecosistemas y el uso de los recursos.

Las categorías mencionadas anteriormente, se pueden agrupar en los tres aspectos del EI99, ya que las 6 primeras categorías se relacionan con la salud humana, las siguientes tres categorías guardan relación con la calidad de los ecosistemas y las últimas dos, por su parte se relacionan con el uso de los recursos. A continuación, se presentan las categorías de impacto y su relación con los componentes del ICV por cada una de las etapas del proceso de obtención de furfural.

1. **Recolección de la biomasa residual**

Esta primera etapa del proceso se involucra con varios de los componentes del inventario: el uso de la ***descerezadora*** para la separación de ***biomasa residual*** empleada, los ***km recorridos*** y la ***gasolina*** utilizada para su transporte hasta los laboratorios de la Universidad El Bosque.

Estos componentes se clasifican o se ven involucrados con los tres aspectos del EI99, ya que por ejemplo, la salud humana se ve indirectamente influenciada por las emisiones a la atmosfera generadas por el vehículo de transporte, ya que de acuerdo con Díaz & Pareja (2022), los vehículos de gasolina de tamaño medio pueden emitir cerca de 143 gramos de CO_2 y 120 mg de NO_X por kilómetro recorrido. En cuanto a la calidad de los ecosistemas, los componentes del ICV mencionados generan un impacto parcialmente negativo, ya que la descerezadora provoca contaminación auditiva, la cual afecta directamente la fauna silvestre en la finca, especialmente a las aves. Sin embargo, ese impacto se describe como parcial porque al extraer o buscar dar uso a la biomasa residual de café, se está iniciando el proceso de buscar alternativas para disminuir el impacto generado por el exceso de residuos orgánicos, una problemática actual en el país (Peñaranda Gonzalez et al. 2017b). Por último, en el uso de recursos, el cual hace referencia a los recursos fósiles y minerales, entra el uso de la gasolina para el transporte de la biomasa (ABC, 2020).

2. **Síntesis de catalizador**

De acuerdo con el alcance y los límites del sistema, se listaron en el inventario únicamente los insumos y equipos de laboratorio más relevantes. Los insumos utilizados fueron ***Acetato de hierro II*** ($C_4H_6O_4Fe$)***, Tetraetilo ortosilicato (TEOS)*** $Si(OC_2H_5)_4$***, Ácido oxálico*** ($H_2C_2O_4$) y ***Etanol*** (C_2H_6O). A partir de la revisión de las fichas de seguridad para cada una de las sustancias (Fisher Scientific, 2022; Merck 2021g, 2021b, 2021e), se conoce que el carácter de peligrosidad es en general de medio a alto. Los impactos potenciales a la salud humana tienen una alta incidencia, en la mayoría de los casos, por la toxicidad y corrosividad de carácter agudo, por lo que, para los investigadores, el riesgo a la salud por manipulación es elevado (NIOSH, 2015).

En cuanto a la salud de los ecosistemas, debido a su carácter de peligrosidad, todas las fichas de seguridad recomiendan que la disposición final sea especial y con mayor cuidado, por los riesgos que se pueden presentar a la biodiversidad si se genera un vertimiento a cuerpos de agua o un escape de las emisiones a la atmósfera. Esto quiere decir, que los impactos en este aspecto del EI99 tienen un alto nivel de potencialidad ya que la manipulación y uso de sustancias es por parte de personas que tienen cierta incertidumbre de cometer errores en cuanto a las buenas prácticas de laboratorio (NIOSH, 2015).

En cuanto a los equipos utilizados, que fueron la estufa de calentamiento y la mufla, se registró una energía consumida de aproximadamente 109 kWh, respecto al total de energía consumida en todos los procesos (este incluido) con los equipos listados en ICV, la cual fue de 147,68 kWh. Estos datos dan

cuenta que la etapa de síntesis de catalizador fue la que tuvo el mayor consumo energético, por las horas que duró la gelificación, secado y calcinación.

El análisis respecto a la energía consumida y las categorías de impacto relacionadas, se encuentra al finalizar la descripción por etapas, ya que comprende un solo análisis para todo el proceso.

3. Tratamiento hidrotérmico

Los componentes del ICV referidos a esta etapa son la ***biomasa residual, el agua destilada*** y ***el reactor de atmósfera inerte***, lo que la hace ser la etapa que tiene menor impacto. La biomasa residual, como se mencionó anteriormente, es un componente que no genera un impacto negativo en sí mismo, es la acumulación de este en las fincas cafeteras el que comienza a ser una problemática en el país, es por ello por lo que se ve relacionado con el aspecto de calidad de los ecosistemas únicamente, con categorías como ecotoxicidad terrestre, acidificación y eutrofización (Alvarado Díaz, 2013). En cuanto al reactor de atmósfera inerte, este no entra en el impacto a la salud humana o al uso de los recursos, únicamente se vería indirectamente relacionado con la calidad de los ecosistemas, ya que requiere del consumo energético para su funcionamiento. Estos reactores, son conocidos porque permiten alcanzar una alta eficiencia ahorrando materias primas y energía, lo que significa un ahorro económico y reducción de impactos ambientales, ya que en su funcionamiento no se generan emisiones atmosféricas por el proceso de condensación, ya que después de llevarlo a altas temperaturas para su evaporación en una presión determinada, sigue el proceso de enfriamiento que dura aproximadamente una hora (Díez, 2010).

Este proceso hidrotérmico fragmenta la biomasa y actúa como precursor para obtener la hemicelulosa, de la que a su vez se obtiene la xilosa y por último el furfural. Las condiciones propiciadas por el reactor actúan como un catalizador propiamente, es por ello por lo que se obtuvieron resultados altos en esta etapa, en comparación con el furfural obtenido de la reacción catalítica, como se mostró en la tabla 5.

En cuanto a los residuos generados, este proceso deja cenizas como resultado del tratamiento a la biomasa y se disponen como residuo orgánico convencional; y también resulta del proceso el hidrolizado, en el que se encuentra el furfural inicial. Este hidrolizado no se utilizó en su totalidad para las siguientes etapas, por lo que se dispuso al alcantarillado regular la cantidad extra. Se dio de esta manera la disposición final a ambos residuos porque no tiene características de peligrosidad contra la salud humana o la calidad de los ecosistemas.

4. Reacción catalítica

En esta etapa se utilizaron los hidrolizados que resultaron de la etapa anterior y ***el catalizador*** como componente del ICV. En cuanto al catalizador, este es un componente que aporta una ventaja sostenible al proceso de obtención de furfural, ya que, en el proceso de síntesis, el ácido utilizado (ácido oxálico) fue utilizado únicamente como precursor para la estructura química del catalizador, sin embargo, no está presente en el resultado final ya que se descompuso después de los procesos de gelificación, secado y calcinación. El residuo de este proceso se obtiene en la filtración luego de la reacción catalítica, en el que, al igual que la etapa anterior, se obtienen cenizas.

Las categorías de impacto que se relacionan con esta etapa son las mismas que el proceso anterior, de lo cual se puede recalcar que tiene un bajo impacto ambiental desde el punto de vista cualitativo. Lo anterior, porque como se mencionó anteriormente, este ACV es de carácter simplificado por tener

faltantes en los datos numéricos de emisiones generadas, las cuales no fueron estimadas ni calculadas en el proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual del cultivo de café.

5. Curva de calibración y cuantificación por HPLC

Por último, están las etapas relacionadas a la curva de calibración y cuantificación de furfural antes y después del uso del catalizador. Los componentes del ICV relacionados a esta etapa en cuanto a insumos son ***Acetonitrilo*** (CH_3CN), ***Agua*** (H_2O), ***Inositol*** ($C_6H_{12}O_6$), ***Xilosa, Alcohol furfurílico*** (98%) ($C_5H_6O_2$) y ***Furfural*** (99%) ($C_5H_4O_2$), y en cuanto a equipos, únicamente el ***HPLC***.

De acuerdo con las fichas de seguridad de los insumos usamos, a nivel general se encuentra que son consideradas como sustancias peligrosas, sin embargo, deben ser dispuestas al gestor de residuos encargado de sustancias y derivados químicos, en lugar de ser dispuestos en el alcantarillado para el caso de los que se encuentran en estado líquido (Merck 2017, 2021a, 2021f, 2021d, 2021c). Los aspectos del EI99 que se relacionan son la salud humana y la calidad de los ecosistemas, ya que los investigadores que manipulan los insumos, siempre tienen un nivel de riesgo por los efectos que puede generar y porque son susceptibles a incidentes en el laboratorio (NIOSH, 2015) y la calidad de los ecosistemas por las alteraciones ecológicas a las que se dieron lugar para obtener estos insumos.

En cuanto al consumo energético, el HPLC fue el segundo equipo que menos utilizó energía para su funcionamiento, con un total de 6,3 kWh para las dos cuantificaciones y la curva de calibración, lo cual tuvo una duración de 12 horas en total. Los resultados que arroja el equipo son los que se muestran a continuación en la figura 13. Allí se observa la formación de picos a lo largo de la gráfica, cada uno de ellos corresponde a una sustancia química, xilosa, furfural, alcohol furfurílico e inositol.

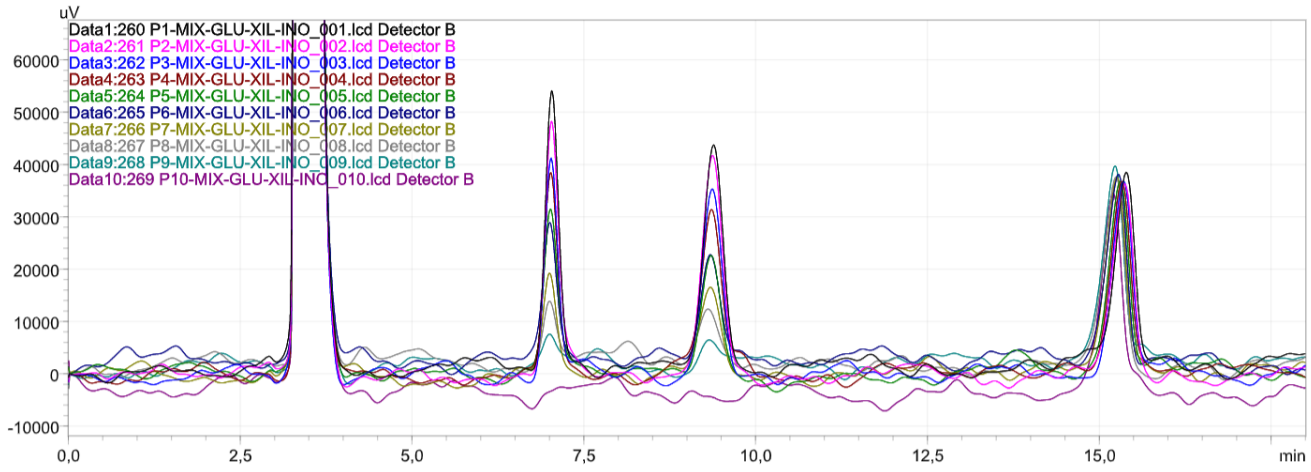

Figura 13. Resultados de la curva de calibración para los azucares.

Terminada la descripción de cada etapa, el último análisis se realiza en cuanto al consumo energético de los equipos empleados. La energía en Colombia es suplida en su mayoría por hidroeléctricas, teniendo este una participación del 76,38% para febrero del presente año, respecto al 23,61% de fuentes no renovables (Pérez Godoy, 2022). Esto permite entender que existe aún, una fuerte dependencia del recurso hídrico para suplir la demanda actual (Portafolio, 2021). Sin embargo, Colombia es un país con un alto potencial para diversificar sus fuentes de energía renovables no convencionales, y de esa forma

reducir el impacto causado por la instalación y mantenimiento de hidroeléctricas a gran escala que causan la pérdida de la biodiversidad y tierras de cultivo, desplazamiento de poblaciones aledañas, afectación a las actividades económicas de la región, además de las alteraciones en el régimen hídrico y morfología de los cuerpos de agua (Andrade and Dos Santos, 2015).

Teniendo en cuenta lo anterior, se presenta en la siguiente tabla el resumen de la energía consumida por cada una de las etapas y equipos usados en todo el proceso experimental.

Tabla 7. *Energía consumida en cada etapa y equipo usado en el proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual de cultivo de café.*

Etapas	Energía consumida (kWh)	Equipos	Energía consumida (kWh)
Síntesis de catalizador	147,12	Estufa	57,60
Tratamiento hidrotérmico	4,60	Mufla	74,40
Reacción catalítica	12,26	HPLC	6,30
HPLC	4,73	Descerezadora	0,18
-	-	Reactor	9,20
Total	**168,71**	**-**	**147,68**

De allí se puede inferir que la etapa que tuvo el más alto consumo energético fue la síntesis del catalizador con 147,12 kWh, lo cual es significativamente mayor a las demás etapas. La razón es porque en esta etapa los periodos de consumo de energía fueron más largos que en las demás, de acuerdo como se detalla en la siguiente tabla resumen, que refleja los kWh consumidos por la plancha de agitación, la estufa y la mufla para las respectivas cargas de hierro (Fe) establecidas para la síntesis.

Tabla 8. *Energía consumida en durante la síntesis del catalizador.*

Carga de Fe	Energía consumida (kWh)	
	Plancha de agitación (6h)	Estufa (12h) y Mufla (6h)
0,5	8,58	56,4
0,5	8,58	
1,5	8,58	56,4
1,5	8,58	
Total	34,32	112,8

Como conclusión de esta fase evaluativa, se tiene que las categorías de impacto con mayor incidencia en el proceso de obtención de furfural, son la ecotoxicidad, acidificación, cambio climático, disminución de la capa de ozono y agotamiento de combustibles fósiles. Estas categorías se relacionan fuertemente con

la etapa de recolección de biomasa residual, transporte de esta a los laboratorios desde la zona de extracción y las demás etapas en cuanto al consumo energético. Esto se debe a que el ACV es desarrollado a un proceso metodológico a escala de laboratorio en el que el ambiente es controlado.

Aspecto económico

Continuando con la evaluación de este ACV, se presenta a continuación el resumen de los costos invertidos para la obtención del furfural. Estos costos comprenden los insumos utilizados, la energía consumida y el personal operativo que realiza las actividades del proceso en el laboratorio.

Tabla 9. *Resumen de costos investidos en cada una de las etapas del proceso de obtención de furfural.*

Etapas	Costos de insumos ($)	Costo energético ($/kWh)	Costo de personal (4h)	Costo total ($) *(insumos, energía, personal)*
Síntesis de catalizador	$281.769	$118.999	$35.079	$435.848
Tratamiento hidrotérmico	$800	$3.720	$175.395	$179.915
Reacción catalítica	$661.313	$9.920	$187.088	$858.321
HPLC	$82.537	$3.822	$245.553	$331.912
Total	$1.026.420	$136.461	$643.115	$1.805.996

En cuanto a los insumos, el cálculo se realizo a partir de la cantidad utilizada en cada procedimiento, en lugar de utilizar la cantidad comprada que se encuentra en las facturas de compra, las cuales se encuentran anexas a este documento. Para el costo energético, en los cálculos se utilizó el precio que actualmente tiene el consumo de 1 kWh en Colombia. ENEL es una de las principales empresas comercializadoras de energía en el país, que ofrece diferentes precios por 1 kWh de acuerdo con la clasificación, el tipo de consumidor, estrato, entre otros. Para el caso de este ACV se seleccionó el precio de $808,86/kWh (COP), el cual corresponde a la clasificación: sector no residencial, nivel de tensión 1 (la cual es de menor voltaje), propiedad del cliente, zona industrial y comercial con contribución y de tipo sencilla (ENEL, 2018).

Las razones por las que el costo unitario de energía varia para los consumidores es porque el precio final es resultado de sumar la inversión de los siguientes procesos: producir energía (*generación*), transportar energía (*transmisión y distribución*), comprar energía eléctrica y venderla al usuario final (*comercialización*) (CREG, 2004), tal como se muestra en la siguiente figura:

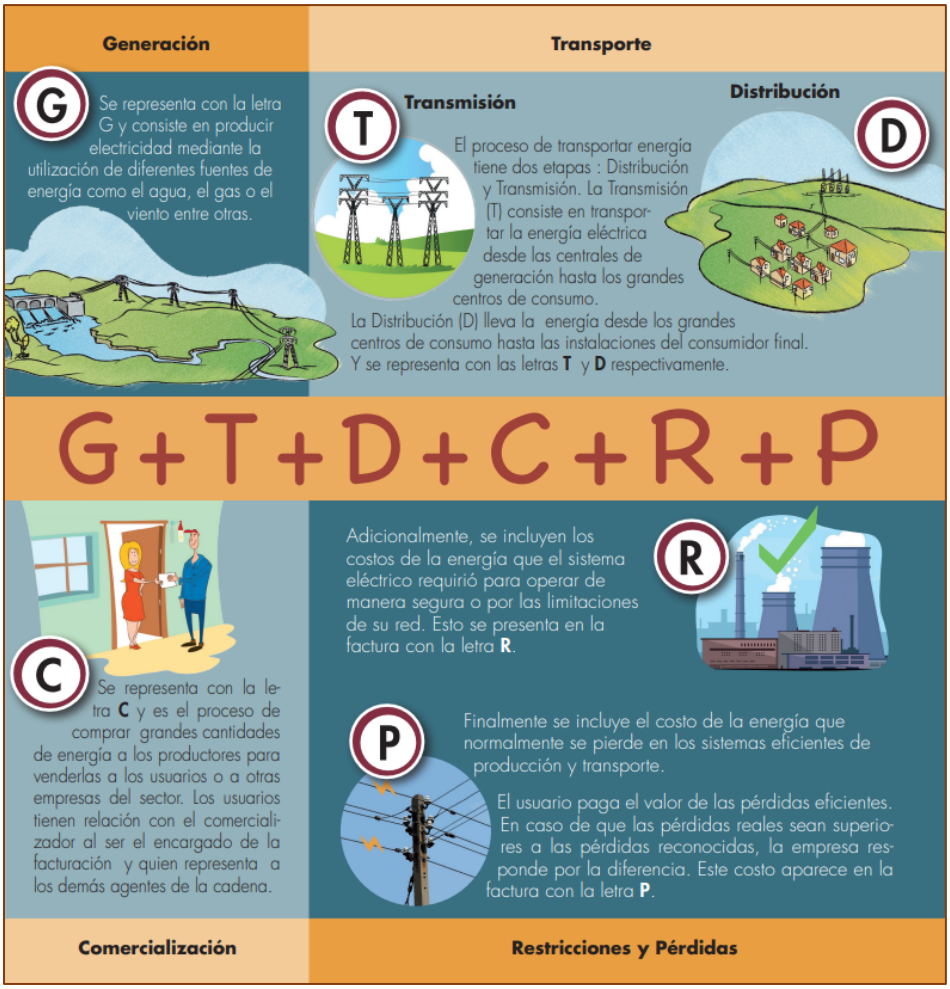

Figura 14. Procesos requeridos para suplir de energía a la población. Tomado de CREG, (2004).

Respecto a los costos del personal operativo, el cálculo se realizó para un solo investigador y el cobro por el trabajo realizado se estableció estimando que, el salario anual de un profesional en Química recién egresado, para este año 2022, es de $22.800.000 (COP), por lo que una hora de salario es de aproximadamente $11.693 (COP) (Talent, 2022). El cobro por hora se multiplicó por el tiempo que dura cada una de las etapas del proceso de obtención de furfural de biomasa residual del cultivo de café como se observó en la tabla.

Como resultado, se puede observar que, entre las etapas listadas la que requirió mayor inversión fue la de reacción catalítica porque en los insumos se tuvo en cuenta el costo requerido para la obtención de cada hidrolizado y el costo requerido para la obtención del catalizador en proceso de síntesis (ver anexo de cálculos). Por el contrario, se observa que la etapa con menor gasto económico fue la del tratamiento hidrotérmico, lo cual se esperaba con anticipación, ya que es el que menos insumos requiere. El costo de insumos para esta etapa fue de $800 (COP), lo cual se justifica del cálculo realizado para la recolección de biomasa residual de cultivo de café.

Para esto último, se estimó que el vehículo utilizado tuviera capacidad para transportar 500 kg de biomasa residual y que los gastos se involucraran en: gasolina, peajes y persona encargada del transporte, lo cual

dio un total de $298.530 (COP), valor que luego se calculó para 20 gramos de biomasa residual, el total de masa utilizada en el proceso. Por último, al analizar los resultados para los tres aspectos calculados: insumos, energía y personal operativo, se observa que, el que tuvo mayor gasto económico fue el de insumos en el que, como se mencionó, tiene indirectamente involucrados los procesos de síntesis de catalizador y tratamiento hidrotérmico; y el de menor gasto fue el energético, lo cual permite identificar otra ventaja de este proceso experimental.

Terminada esta fase de evaluación, continua en este ACV la parte final, la interpretación de los resultados obtenidos en las fases anteriores.

Interpretación de los resultados del inventario y evaluación del ciclo de vida

De acuerdo con la ISO 14044, en esta fase se interpretan los resultados de las fases de ICV y EICV de acuerdo con el objetivo y el alcance establecidos al inicio de este ACV. En esta interpretación se incluyen los análisis de integridad, sensibilidad y coherencia (ISO, 14044 de 2006).

Teniendo en cuenta lo anterior, se hace mención nuevamente del objetivo y alcance establecidos para este ACV. El objetivo es *desarrollar el Análisis de Ciclo de Vida del proceso de obtención de furfural a partir de biomasa residual del cultivo de café, a través de la inclusión de las variables involucradas en la transformación, con el fin de evaluar los impactos ambientales que se generan.* Y el alcance que nos permite definir el límite del sistema, va *desde la obtención de biomasa residual en el cultivo de café, a la obtención de la sustancia química*, lo cual se describe como "de la cuna a la puerta", tal como se mencionó al iniciar el apartado de resultado, análisis y discusión. La figura 4 presenta el proceso metodológico en procesos unitarios, en el que se resaltan los límites del sistema y las siete etapas seleccionadas en este ACV.

Al tener presentes el objetivo y alcance, se presentan a continuación los análisis que permiten evaluar el desarrollo del ACV en sus etapas de inventario y evaluación. Luego de ello, se presentan las conclusiones y recomendaciones útiles para el público de interés, el cual está compuesto por los investigadores que presentaron y desarrollaron la propuesta metodológica de obtención de furfural.

Análisis de integridad

Como se mencionó anteriormente, en esta fase se verifica si la información utilizada está disponible y completa. De acuerdo con ello, se menciona que las consultas realizadas en bibliografía fueron tomadas de diferentes bases de datos, principalmente de Science Direct como fuente inicial de los documentos que compartieron similitud y dieron guía para el desarrollo del presente ACV. Se tuvo acceso a varios de los artículos e investigaciones consultadas gracias a la licencia que otorga la Universidad El Bosque.

En cuanto a la información suministrada en el ICV, como se mencionó anteriormente, los datos fueron calculados, estimados o consultados en la bibliografía según fue el caso. En el resultado del ICV, se presenta un apartado que detalla las fuentes de información para cada componente del inventario y, además, se justifica a partir del objetivo y alcance, cuáles son los datos no incluidos en el ACV y su explicación. A continuación, se presenta en la tabla las fuentes de información para la potencia respectiva a cada equipo utilizado:

Tabla 10. *Referencias usadas para establecer potencia de los equipos.*

Equipos	Etapas en las que se usaron	Fuente de datos
Estufa de calentamiento	Tratamiento físico y síntesis de catalizador	Ficha técnica (Laboratorio)
Mufla	Tratamiento físico y síntesis de catalizador	(SCI FINETECH, 2013)
HPLC	Curva de calibración y cuantificación de etapas 3 y 6	Factor de potencia de categoría *Químicas* como (Calculators Conversion, 2022).
Descerezadora	Obtención de biomasa residual	(JOTAGALLO, 2022)
Plancha de agitación	Síntesis de catalizador y reacción catalítica.	Foto del equipo (Amp 13, 110V)
Pirómetro	Tratamiento hidrotérmico y reacción catalítica	Ficha técnica (Laboratorio)
Resistencia	Tratamiento hidrotérmico y reacción catalítica	(MercadoLibre, 2022)
Evaporador rotatorio	Purificación	(Alquimialab, 2022)

Análisis de sensibilidad

En este apartado se continua la verificación de los datos, aportando además la confiabilidad de los resultados según lo que menciona la norma (ISO, 14044 de 2006).

De acuerdo con lo mencionado en los aspectos éticos, en la presente investigación se utilizó Mendeley como gestor de referencias para toda la bibliografía consultada. Algunos de las acciones realizadas para tener mayor confiabilidad en la información tomada y por ende en los resultados obtenidos, es que, al abrir un espacio en la red, se verificó que la fuente que publica sea confiable, es decir proveniente de una base de datos, o de una institución de educación establecida o incluso de una comercializadora de productos químicos; también se hizo revisión cuidadosa, que las fuentes mencionaran el año de publicación y el autor (*si fuera el caso*).

A partir de ello, se obtuvo la información faltante en el ICV y la que permitió dar soporte y discusión a los análisis de resultados en la fase de evaluación de impactos. Sin embargo, se considera que, al hacer falta los datos numéricos de salida, la incertidumbre de los resultados y las conclusiones de ellas tiene una gran influencia en la conclusión macro del ACV, la cual busca responder acerca de la viabilidad de implementar la metodología propuesta a escala de laboratorio.

Análisis de coherencia

Se presenta en este apartado la pertinencia que tienen los métodos y las suposiciones usadas a lo largo del ACV, además de la coherencia que esto permite tener con el objetivo y el alcance (ISO, 14044 de 2006). Como se pudo observar, los resultados obtenidos del inventario y de la evaluación se relacionan

fuertemente con el objetivo y alcance, ya que siempre se mantuvo el desarrollo de la investigación dentro de las etapas que fueron seleccionadas como procesos unitarios del ACV: recolección de biomasa residual del cultivo de café, caracterización física, tratamiento hidrotérmico, reacción catalítica y cuantificación por HPLC antes y después del uso de catalizador. Además de ello, los resultados en la fase de evaluación permiten concluir que los impactos ambientales potenciales generados por el ACV son la ecotoxicidad, acidificación, cambio climático, disminución de la capa de ozono y agotamiento de combustibles fósiles; los cuales se relacionan fuertemente con la etapa de recolección de biomasa residual y el transporte de esta a los laboratorios principalmente; aunque las demás etapas se relacionan con los impactos en cuanto al consumo energético.

En cuento a los costos económicos que tuvieron cada una de las etapas, se obtiene al final que el costo total del desarrollo metodológico y experimental fue de $1.805.996 (COP), siendo la etapa de síntesis de catalizador la de mayor costo.

Conclusiones y recomendaciones

Parte de las conclusiones ya fueron registradas en la interpretación del ciclo de vida, tal y como se indica en la ISO 14044. Sin embargo, en esta fase las conclusiones se centran en establecer la viabilidad de implementar la metodología propuesta a partir de los resultados obtenidos en cuanto a los costos y su relación con la cantidad de furfural obtenido. Ese resultado fue de 38,58717 mg de furfural por cada gramo de biomasa, con una inversión total de $1.805.996 (COP) (*como se observa en la tabla 9*).

Esto permite concluir que se requiere de una alta inversión para obtener una pequeña cantidad de furfural, que a su vez no tiene el valor económico que se esperaba, ya que su costo actualmente en el mercado por cada gramo de furfural es de $1.052 (COP). Esto genero que el valor económico del total de furfural obtenido en la metodología propuesta fuera de $40,58 (COP).

Lo anterior, permite concluir que a pesar de contar con una gran cantidad de investigaciones acerca del aprovechamiento de la biomasa residual, este continúa con el gran reto de hallar procesos eficientes, que sean de menor costo en inversión y a su vez se obtenga un alto porcentaje de la sustancia química o energía por la que fue tratado químicamente.

Tabla 11. *Cantidad y costos de furfural obtenido.*

Furfural obtenido			**Purificación de Furfural**			**Costo de furfural obtenido luego de purificación ($)**
Etapas	**Tratamientos**	**mg furfural/g biomasa**	**Tiempo (h)**	**Energía Evaporador rotatorio (kW)**	**Costo energético ($/kWh)**	
Tratamiento hidrotérmico	H1	2,02118	0,25	0,025	$20	60,80
	H2	4,92243				
	H3	2,97222				
	H4	**6,20014**				
	RC-H1	5,04990				

Reacción catalítica	**RC-H2**	**5,98421**			
	RC-H3	**5,98012**			
	RC-H4	5,45696			
	Total (mg)	**38,58717**			
	Costo ($)	**40,58**			

Continuando con las conclusiones, se obtuvo que los procesos realizados a escala de laboratorio generan bajos impactos ambientales debido a las condiciones controladas de los procesos experimentales.

Bibliografía

ABC. 2020. "¿Cómo Se Obtienen La Gasolina y El Gasoil?" *Diario ABC, S. L.* Retrieved November 7, 2022 (https://www.abc.es/motor/reportajes/abci-como-obtienen-gasolina-y-gasoil-202006040205_noticia.html).

Alcaldia Municipal Puente Nacional Santander. 2018. "Límites Del Municipio:" *Nuestro Municipio*. Retrieved November 27, 2021 (http://www.puentenacional-santander.gov.co/municipio/nuestro-municipio).

Alquimialab. 2022. "Rotavapor / Evaporador Rotatorio Vertical Premium EVA-05." *Ventas Alquimialab*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.alquimialab.com/rotavapor-evaporador-rotatorio-vertical-premium-eva-05/).

Alvarado Díaz, Elsa Gabriela. 2013. "ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE LA PRODUCCIÓN DE UN ADITIVO POLIMÉRICO CON NANOPARTÍCULAS DE ZnO." *Centro de Investigación En Materiales Avanzados, S.C.* Retrieved November 8, 2022 (https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/351/1/Tesis Elsa Gabriela Alvarado Díaz.pdf).

Andrade, André De Lima, and Marco Aurélio Dos Santos. 2015. "Hydroelectric Plants Environmental Viability: Strategic Environmental Assessment Application in Brazil." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52:1413–23.

Bautista Rodríguez, Sandra Cecilia, Lyzed Toloza Blanco, and Aida Sanes Orrego. 2019. "Guía Para El Análisis de Ciclo de Vida En El Sector Industrial de Impresión y Litografía : El Caso de Legis S.A." *Universidad Central*, 1–28.

Buitrago, Shirley, Angelica Sanchez, Jhon Zolaque, Lina Mosquera, Diana Cuadras, Wilson Suarez, Yolima Pardo, Yeilly Pinzon, Emma Isabel, Emma Florez, Juan Ariza, and Gerardo Rocha. 2016. *Plan de Desarrollo Municipal 2016-2019*.

Calculators Conversion. 2022. "Calculadora Rápida (VA a Watt) - Fácil Conversión." Retrieved November 4, 2022 (https://www.calculatorsconversion.com/es/convertir-va-a-watts-calculadora-online/).

Cámara de Comercio de Bucaramanga. 2018. "Aumento En Cultivos de Café En Santander Nos Ubica En El Séptimo Puesto a Nivel Nacional: 'Conozca Las Cifras Por Provincia.'" Retrieved November 5, 2022 (https://www.camaradirecta.com/noticias//aumento-en-cultivos-de-cafe-en-santander-nos-ubica-en-el-septimo-puesto-a-nivel-nacional-conozca-las-cifras-por-provincia-/).

Carrillo González, Graciela. 2009. "Una Revisión de Los Principios de La Ecología Industrial." *Argumentos (México, D.F.)* 22(59):247–65.

Castillo, Santiago, Nicolás Ferreyra, and Tomás Gherardi. 2019. "Proyecto Final: Producción de Furfural a Partir de Cáscara de Arroz." *UTN-Facultad Regional de Avellaneda* 10–11.

CREG. 2004. "Variación Del Costo de Prestación Del Servicio - Energía." *CREG | Comisión de Regulación de Energía y Gas*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.creg.gov.co/images/contenidos_estaticos/documentos/FOLLETO_FORMULA_ENE

RGIA_IMPRESOR.pdf).

Dashtban, Mehdi, Allan Gilbert, and Pedram Fatehi. 2012. "Production of Furfural: Overview and Challenges." Pp. 44–53 in *J-FOR*. Vol. 2.

Díaz, Borja, and Rodrigo Pareja. 2022. "Eléctricos, Híbridos, Diésel y Gasolina: Así Contaminan." Retrieved November 7, 2022 (https://www.caranddriver.com/es/coches/planeta-motor/a30780438/emisiones-contaminantes-segun-tipo-coche/).

Díez, Fernando. 2010. "Reactores Catalíticos Para Mejorar La Calidad de Vida." *Universidad de Oviedo - Agencia Sinc*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.agenciasinc.es/Reportajes/Reactores-cataliticos-para-mejorar-la-calidad-de-vida).

ENEL. 2018. "Tarifas de Energía | Enel Colombia." *Enel S. A. Colombia*. Retrieved November 7, 2022 (https://www.enel.com.co/es/personas/tarifas-energia-enel-distribucion.html).

Eurofins. 2021a. "Análisis de Ciclo de Vida (ACV): Qué Es y Para Qué Sirve. (2021)." *Envira Ingenieros Asesores*. Retrieved November 29, 2021 (https://envira.es/es/analisis-de-ciclo-de-vida/).

Eurofins. 2021b. "Análisis de Ciclo de Vida (ACV): Qué Es y Para Qué Sirve | Envira Ingenieros Asesores." *Envira Ingenieros Asesores*. Retrieved November 29, 2021 (https://envira.es/es/analisis-de-ciclo-de-vida/).

Farela Lara, Lesly Evangelina. 2017. "'Extracción y Caracterización Del Mucílago de La Semilla de Chan (Salvia Hispánica L.) Para La Determinación de Los Parámetros de Aplicación Como Aditivo Espesante En Función a La Concentración En Mermelada de Fresa.'" *Universidad Rafael Landívar* 140.

Fernández Fernández, José Luis, and Anna Bajo Sanjuán. 2012. "La Teoría Del Stakeholder o de Los Grupos de Interés, Pieza Clave de RSE, Del Éxito Empresarial y de La Sostenibilidad." *ADResearch: Revista Internacional de Investigación En Comunicación* 6(6):130–43.

Fisher Scientific. 2022. "Acetato de Hierro(II), 95 %, Thermo Scientific | Fisher Scientific." *Thermo Fisher Scientific Inc.* Retrieved November 8, 2022 (https://www.fishersci.es/shop/products/iron-ii-acetate-95-thermo-scientific/10398970).

Harrar de Dienes, Aicia, and Tomás Gómez Navarro. 2008. "Alternativas de Empaque Para Galletas de Mantequilla: Evaluación Comparativa Del Ciclo de Vida." *Anales de La Universidad Metropolitana, ISSN-e 1856-9811, Vol. 8, Nº. 1, 2008, Págs. 163-185* 8(1):163–85.

Haya Leiva, Esperanza. 2016. "Análisis de Ciclo de Vida." *Escuela de Organización Industrial* 43.

Ilari, Alessio, Giuseppe Toscano, Ester Foppa Pedretti, Sara Fabrizi, and Daniele Duca. 2020. "Environmental Sustainability of Heating Systems Based on Pellets Produced in Mobile and Stationary Plants from Vineyard Pruning Residues." *Resources 2020, Vol. 9, Page 94* 9(8):94.

JOTAGALLO. 2022. "DESPULPADORA JOTAGALLO REF. 2 ½." *JOTAGALLO*. Retrieved November 4, 2022 (https://jotagallo.com/producto/despulpadora-jotagallo-ref-2-½/).

Kapanji, Kutemba K., Somayeh Farzad, and Johann F. Görgens. 2021. "Life Cycle and Sustainability Assessments of Biorefineries Producing Glucaric Acid, Sorbitol or Levulinic Acid Annexed to a Sugar Mill." *Journal of Cleaner Production* 295:126339.

Khoo, Hsien H., Loretta L. Wong, Jonathan Tan, Valerio Isoni, and Paul Sharratt. 2015. “Synthesis of 2-Methyl Tetrahydrofuran from Various Lignocellulosic Feedstocks: Sustainability Assessment via LCA.” *Resources, Conservation and Recycling* 95:174–82.

Larnaudie, Valeria, Mario Daniel Ferrari, and Claudia Lareo. 2021. “Life Cycle Assessment of Ethanol Produced in a Biorefinery from Liquid Hot Water Pretreated Switchgrass.” *ELSEVIER - Renewable Energy*.

Leiva, Esperanza Haya. 2016. “Análisis de Ciclo de Vida.” 43. Retrieved November 29, 2021 (https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/analisis-de-ciclo-de-vida.aspx).

MercadoLibre. 2022. “Resistencia Electrica De Potencia | MercadoLibre 📦.” *MercadoLibre Colombia LTDA*. Retrieved November 8, 2022 (https://listado.mercadolibre.com.co/resistencia-electrica-de-potencia).

Merck. 2017. “Furfural MSDS - 804012 - Merck.” *Merck KGaA*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/msds/MDA_CHEM-804012?Origin=PDP).

Merck. 2021a. “Acetonitrilo MSDS - 100003 - Merck.” *Merck KGaA*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/msds/MDA_CHEM-100003?Origin=PDP).

Merck. 2021b. “Ácido Oxálico MSDS - 816144 - Merck.” *Merck KGaA*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/msds/MDA_CHEM-816144?Origin=PDP).

Merck. 2021c. “Alcohol Furfurílico MSDS - 804015 - Merck.” *Merck KGaA*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/msds/MDA_CHEM-804015?Origin=PDP).

Merck. 2021d. “D(+)-Xilosa MSDS - 108689 - Merck.” *Merck KGaA*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/msds/MDA_CHEM-108689?Origin=PDP).

Merck. 2021e. “Etanol MSDS - 100983 - Merck.” *Merck KGaA*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/msds/MDA_CHEM-100983?Origin=PDP).

Merck. 2021f. “Mio-Inosita MSDS - 104507 - Merck.” *Merck KGaA*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/msds/MDA_CHEM-104507?Origin=PDP).

Merck. 2021g. “Tetraetilo Ortosilicato MSDS - 800658 - Merck.” *Merck KGaA*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.merckmillipore.com/CO/es/product/msds/MDA_CHEM-800658?Origin=PDP).

Ministerio de Comercio Industria y Turismo. 2015. “Decreto Unico Reglamentario 2420 Del 2015.”

Muller Nigri, Elbert, Aline Capanema De Barros, Sonia Denise Ferreira Rocha, and Eduardo Romeiro Filho. 2014. “Assessing Environmental Impacts Using a Comparative LCA of Industrial and Artisanal Production Processes: ‘Minas Cheese’ Case.” *Food Science and Technology* 34(3):522–31.

Muñoz Razo, Carlos. 2011. *Cómo Elaborar y Asesorar Una Investigación de Tesis*. Segunda Ed. edited by S. A. de C. . Pearson Educación de México. México.

NIOSH. 2015. “Efectos de Las Sustancias Químicas Al Contacto Con La Piel: Guía de Salud

Ocupacional Para Profesionales de La Salud y Empleadores." *Instituto Nacional Para La Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH) - N° 2011-200*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.cdc.gov/spanish/niosh/docs/2011-200_sp/default.html).

Organización Internacional de Normalización [ISO]. 2006. *UNIT-ISO 14044*.

Organización Internacional de Normalización [ISO]. 2007. *Gestión Ambiental: Principios y Marco de Referencia Del Análisis de Ciclo de Vida. Norma Técnica ISO 14040*.

Peñaranda Gonzalez, Laura Victoria, Sandra Patricia Montenegro Gómez, and Paula Andrea Giraldo Abad. 2017a. "Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales En Colombia." *RIAA, ISSN-e 2145-6453, Vol. 8, Nº. 2, 2017, Págs. 141-150* 8(2):141–50.

Peñaranda Gonzalez, Laura Victoria, Sandra Patricia Montenegro Gómez, and Paula Andrea Giraldo Abad. 2017b. "Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales En Colombia." *RIAA, ISSN-e 2145-6453, Vol. 8, Nº. 2, 2017, Págs. 141-150* 8(2):141–50.

Pérez Godoy, María Camila. 2022. "Precio de Bolsa de Energía Tuvo Un Incremento de 47,9% En El Segundo Mes de 2022." *LR | La República*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.larepublica.co/economia/precio-de-bolsa-de-energia-tuvo-un-incremento-de-47-90-en-segundo-mes-de-2022-3330012).

Pinzón Rodríguez, Juan José. 2018. "Análisis Del Ciclo de Vida de La Elaboración Del Queso Tipo Cuajada En Una Finca Ganadera Del Municipio de Puerto López, Meta Como Herramienta de Gestión Ambiental En La Empresa."

Pinzón Rodríguez, Juan José. 2020. *Análisis de Ciclo de Vida (ISO 14040) de Un Producto*.

Portafolio. 2021. "Colombia Necesita Avanzar Hacia Diversificación de Fuentes de Energía | Economía | Portafolio." *Portafolio - Economía*. Retrieved November 8, 2022 (https://www.portafolio.co/economia/colombia-necesita-avanzar-hacia-diversificacion-de-fuentes-de-energia-550378).

Puentes Rueda, Daniela. 2021. "$850 Mil Millones Le Genera El Alza Histórica Del Café a Santander ." *Vanguardia.Com*. Retrieved November 6, 2022 (https://www.vanguardia.com/economia/local/850-mil-millones-le-genera-el-alza-historica-del-cafe-a-santander-YK4518436).

RAE. 2021. "Biomasa | Definición | Diccionario de La Lengua Española | RAE." *Real Academia Española*. Retrieved November 29, 2021 (https://dle.rae.es/biomasa).

Raman, J. K., and Edgard Gnansounou. 2017. "Life Cycle Assessment of Vetiver-Based Biorefinery With Production of Bioethanol and Furfural." Pp. 147–65 in *Life-Cycle Assessment of Biorefineries*. Elsevier.

Renishaw plc. 2022. "Generación de Atmósfera Inerte." Retrieved October 3, 2022 (https://www.renishaw.es/es/generacion-de-atmosfera-inerte--31885).

Rincón Gamba, Wendy Lorena. 2017. "Diagnóstico Del Conflicto Socio-Ambiental Del Proyecto Diluyente 120 En El Municipio de Puente Nacional (Santander) Desde La Perspectiva de Las Comunidades Locales." Universidad Libre.

Rodríguez Valencia, Nelson, and Diego Zambrano Franco. 2010. "Los Subproductos Del Café: Fuente

de Energía Renovable." *Avances Técnicos Cenicafé* (3):8.

Rodríguez Valencia, Nelson, and Diego Antonio Zambrano Franco. 2010. "Los Subproductos Del Café: Fuente de Energía Renovable." *Fondo Nacional Del Café*. Retrieved November 29, 2021 (https://studylib.es/doc/5908764/los-subproductos-del-café--fuente-de-energía-renovable).

Rojas Zerpa, Juan Carlos. 2018. "Ecoindicador 99 [Video]. YouTube." *YouTube*. Retrieved October 25, 2022 (https://www.youtube.com/watch?v=1RYLmxtUoZo&ab_channel=JuanRojas).

Sánchez, Oscar Julián, Carlos Ariel Cardona, and Diana Lucía Sánchez. 2007. "Análisis de Ciclo de Vida y Su Aplicación a La Producción de Bioetanol: Una Aproximación Cualitativa." *Revista Universidad EAFIT* 43(146):59–79.

SCI FINETECH. 2013. "Electric Muffle FURNACE." Retrieved November 4, 2022 (http://www.scifinetech.com/sub.html?actobj=viewgoods&g_key=1000000015).

Silva Forero, Jenifer Julieth. 2019. "Obtención de Furfural a Partir de Xilosa Usando Catalizadores Heterogéneos de Cascarilla de Cacao." Universidad Jorge Tadeo Lozano.

Talent. 2022. "Salario Para Químico En Colombia - Salario Medio." *Talent.Com*. Retrieved November 8, 2022 (https://co.talent.com/salary?job=químico).

Tamayo Alzate, Alonso. 1999. "Teoría General de Sistemas." 84–89.

TECPA. 2022. "¿Qué Es El Análisis de Ciclo de Vida (ACV)? Formación de Ingenieros." *TECPA Consultoría Ambiental*. Retrieved November 3, 2022 (https://www.tecpa.es/que-es-el-analisis-de-ciclo-de-vida-acv/).

ULPGC. 2022. "Biblioguías: Cómo Evitar El Plagio: ¿Qué Es El Plagio?" *Biblioteca Universitaria | Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*.

Verbitsky, Oleg, and Svetlana Pushkar. 2018. "Eco-Indicator 99, Recipe and Anova for Evaluating Building Technologies under LCA Uncertainties." *Environmental Engineering and Management Journal* 17(11):2549–59.

Vidal, Gladys, Patricio Neumann, and Almudena Hospido. 2022. *ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA: FUNDAMENTOS Y APLICACIONES A LA GESTIÓN SUSTENTABLE DE LOS RECURSOS HÍDRICOS*. Primera ed. edited by G. Vidal, P. Neumann, and A. Hospido. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.

Waters. 2022. "Guía de Iniciación a La Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC) | Waters." *Waters*. Retrieved October 25, 2022 (https://www.waters.com/nextgen/xg/es/education/primers/beginner-s-guide-to-liquid-chromatography.html).