



DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

TRABAJO PROFESIONAL

“ANÁLISIS INTEGRAL DEL PROCESO DE
HIDROCARBONIZACIÓN DE LOS RESIDUOS DE LA
PERCOLACIÓN DE CAFÉ”.

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

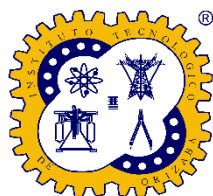
I.Q. DANIEL ORDUÑA GAYTAN

DIRECTOR DE TESIS:

*DR. ALEJANDRO ALVARADO
LASSMAN*

CO-DIRECTOR DE TESIS:

*DR. JUAN MANUEL MÉNDEZ
CONTRERAS*





EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Orizaba, Veracruz, 18/octubre/2023

Dependencia: División de Estudios de
Posgrado e Investigación
Asunto: Autorización de Impresión
OPCION: I

C. DANIEL ORDUÑA GAYTÁN

Candidato(a) a Grado de Maestro(a) en:
CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E.-

De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros e Institutos Tecnológicos Federales del Tecnológico Nacional de México, de la Secretaría de Educación Pública, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

"Análisis integral del proceso de hidrocarbonización de los residuos de la percolación de café."

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

Cuahtémoc Sánchez R.

Dr. CUAHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



OG-13-F06



Av. Oriente 9 Núm.852, Colonia Emiliano Zapata. C.P. 94320 Orizaba, Veracruz.
Tel. 01 (272)1105360 e-mail: dir_orizaba@tecnm.mx tecnm.mx | orizaba.tecnm.mx



2023
Francisco
VILLA



Orizaba, Veracruz, 25/septiembre/2023
Asunto: Revisión de trabajo escrito

C. CUAUHTÉMOC SÁNCHEZ RAMÍREZ
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E.-

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C.

DANIEL ORDUÑA GAYTÁN

La cual lleva el título de:

"Análisis integral del proceso de hidrocarbonización de los residuos de la percolación de café"

Y concluyen que se acepta.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
CIENCIA - TÉCNICA - CULTURA®

PRESIDENTE: DR. ALEJANDRO ALVARADO LASSMAN

SECRETARIO: DR. JUAN MANUEL MÉNDEZ CONTRERAS

VOCAL: MIQ. NORMA ALEJANDRA VALLEJO CANTÚ

VOCAL SUP.: DRA. OFELIA LANDETA ESCAMILLA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

FIRMA

TA-09-18



Declaración de originalidad y cesión de derechos

Orizaba, Veracruz, el día 23 del mes de Octubre del año 2023.

El que suscribe

C. Daniel Orduña Gaytán

Declaro que esta tesis, que tiene una extensión de 107 cuartillas, ha sido escrita por mí y constituye el registro escrito del trabajo de la tesis titulada

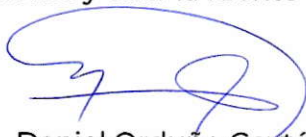
“Análisis integral del proceso de hidrocarbonización de los residuos de la percolación de café”

del programa: Maestría en Ciencias en Ingeniería Química bajo la asesoría y dirección del Dr. Alejandro Alvarado Lassman y Dr. Juan Manuel Méndez Contreras y no ha sido sometida en ninguna otra institución previamente.

Todos los datos y las referencias a materiales ya publicados están debidamente identificados con su respectivo crédito e incluidos en las notas bibliográficas y en las citas que se destacan como tal y, en los casos que así lo requieran, cuento con las debidas autorizaciones de quienes poseen los derechos patrimoniales. Por lo tanto, me hago responsable de cualquier litigio o reclamación relacionada con derechos de propiedad intelectual, exonerando de toda responsabilidad al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba.

También declaro que, al presentar esta tesis, cedo los derechos del trabajo al Tecnológico Nacional de México campus Orizaba para su difusión, con fines académicos y de investigación, bajo las regulaciones propias de la institución y que si existe algún acuerdo de confidencialidad de la información lo haré saber en forma escrita para que se omitan las secciones correspondientes.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y del director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: depi_orizaba@tecnm.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.



Daniel Orduña Gaytán

DEDICATORIAS

A quien algún día me dará la libertad que tanto deseo...

A mi hermano Francisco Orduña, quien me ha amado desde que estuve en el vientre de mi madre, que a pesar de cualquier plan que tengamos, siempre nos apoyaremos hasta el final de los tiempos, y si Dios llama a alguno a su presencia, así pues, nos veremos en el otro lado.

A mis hermanos juramentados, Aldo Crisóstomo, Erik Sorcia y Enrique Hernández, que, en la situación más triste y adolorida que pueda existir, ustedes siempre me hacen reír y llorar de alegría, y aunque me llevan un año de ventaja de amistad, siempre seremos los mismos niños de secundaria.

A mis padres, quienes se han sacrificado por mi hermano y por mí, que siguen esforzándose en los caminos del Señor, y como ha mencionado mi hermano, Padre, Madre, ustedes son los verdaderos ingenieros, maestros y doctores, los amo infinitamente.

A mis amigas, Elisa Carbajal, gracias por siempre estar en los momentos más divertidos y difíciles de mi vida, Laura Palagot y Angelica Cariño, gracias por apoyarme desde primer semestre de licenciatura, y henos aquí, terminando la maestría juntos, las amo como no tienen idea.

A mis amigos que forme durante toda la licenciatura y maestría, quienes me apoyaron y me impulsaron a seguir adelante, poniendo ese granito de arena hasta convertirlo en un castillo.

A mis hermanos en la fe, que a pesar de que me he distanciado un poco de ustedes, sepan que pueden contar conmigo, y que seré un apoyo incondicional para quien lo necesite.

Y, por último, esto te lo dedico a ti Danonino del futuro, que en donde quiera que te encuentres seas feliz y hayas logrado cosas increíbles, y si así no lo fuera, no te preocupes, aun tienes mucho tiempo por delante, enorgullece al nanis pequeño pues el guarda todas las alegrías e ilusiones, y es quien anhela ser el rey de los piratas, para así, ser el hombre más libre que pueda existir.

RECONOCIMIENTOS ACADÉMICOS

A mi asesor el Dr. Alejandro Alvarado Lassman, por aceptarme en su equipo de trabajo en estos dos años, quien me brindó la ayuda y consejos brindados para la culminación de la maestría en ciencias.

A mi comité de tesis, al Dr. Juan Manuel Méndez Contreras, MIQ. Norma Alejandra Vallejo Cantú, a la Dr. Ofelia Landeta Escamilla, quienes marcaron sus observaciones para mejorar día a día y con las contribuciones que sumaron en todo este proceso.

Al Tecnológico Nacional de México Campus Orizaba, por brindar su apoyo con sus instalaciones y su gremio, el cual me permitió el realizar esta investigación, y finalizar la tesis de grado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por apoyarme y permitirme ser su becario en Maestría en Ciencias en Ingeniería Química (CVU) 1150980

PRESENTACIONES EN CONGRESOS

2023	Evaluación del desempeño de la producción de hidrochar para el tratamiento de residuos de la percolación del café en un reactor hidrotérmico de alta presión	AMIDIQ 2023 Ponencia presencial
2023	Balance energético del biocarbón generado a partir de residuos de café gastado mediante el proceso de carbonización hidrotérmica	CIDSER 2023 Ponencia presencial

RESUMEN

“Análisis integral del proceso de hidrocarbonización de los residuos de la percolación de café”

Elaborado por: I.Q. Daniel Orduña Gaytán

Dirigida por: Dr. Alejandro Alvarado Lassman

Dr. Juan Manuel Méndez Contreras

Actualmente, alrededor del mundo la hidrocarbonización se ha convertido en una alternativa prometedora para el manejo y aprovechamiento de residuos, debido a que el producto obtenido (hidrochar) puede ser utilizado como mejorador de suelos y generador de bioenergéticos, además cuyas características operativas pueden resultar en costos de operación y mantenimientos menores a otros tipos de tratamientos. A pesar de esto, la urbanización y el desarrollo socioeconómico en los países en desarrollo y desarrollados, ha resultado en un aumento acelerado en la generación de desechos municipales, industriales y agrícolas. El residuo de café por percolación o residuos de café gastado (RCG), tienen origen dentro del negocio de las cafeterías, quienes no cuentan con un manejo ni disposición de los residuos que se adecuen a sus posibilidades, generando así, grandes cantidades de residuos. Es por lo que, este estudio presenta una propuesta de aprovechamiento de los RCG a través de este proceso de biotransformación en un Reactor Hidrotérmico de Alta Presión (RHAP) evaluando tres niveles de temperatura (175, 185 y 200 °C) y tiempos de residencia hidráulica (60, 120 y 180 min) a 1.8 mPa en lotes de 350 g de RCG.

ABSTRACT

“Integral analysis of the hydrocarbonization process of coffee percolation residues”

By: I.Q. Daniel Orduña Gaytán

Advisor(s): Dr. Alejandro Alvarado Lassman

Dr. Juan Manuel Méndez Contreras

Currently, around the world, hydrothermal carbonization has become a promising alternative for the management and utilization of waste, since the obtained product (hydrochar) can be used as a soil improver and a bioenergy generator. Additionally, its operational characteristics can result in lower operating and maintenance costs compared to other types of treatments. Despite this, urbanization, and socio-economic development in both developing and developed countries have led to a rapid increase in the generation of municipal, industrial, and agricultural waste.

The waste from coffee percolation, or spent coffee waste (SCW), originates within the coffee shop business, where there is often a lack of suitable waste management and disposal practices, leading to the generation of large quantities of waste. Therefore, this study presents a proposal for utilizing SCW through the hydrothermal transformation process in a High-Pressure Hydrothermal Reactor (HPHR), evaluating three temperature levels (175, 185, and 200 °C) and hydraulic residence times (60, 120, and 180 min) at 1.8 MPa, using batches of 350 g of SCW

ÍNDICE

NOMENCLATURA	V
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	4
1.1 Producción mundial del café	4
1.1.1 Producción de café en México.....	6
1.1.2 Consumo de café	7
1.1.3 Residuos de café.....	9
1.1.4 Aprovechamiento de residuos en los procesos termoquímicos	11
1.1.5 Carbonización Hidrotérmica	13
1.1.6 Material carbonoso derivado de la borra de café	14
1.1.7 Factores importantes en el desarrollo de la hidrocarbonización	15
1.1.8 Fases del proceso de la hidrocarbonización	18
1.1.9 Productos finales de la hidrocarbonización.....	21
1.1.10 Ventajas y desventajas del proceso de hidrocarbonización	21
1.1.11 Implementación en áreas de aplicación del hidrocarbón	23
1.2 Análisis Integral	23
1.2.1 Indicadores de Rentabilidad	24
1.2.2 Valor Actual Neto	25
1.2.3 Valor Económico Agregado	27
1.2.4 Diferencias entre el Valor Económico Agregado y el Valor Actual Neto.....	28
1.2.5 Tasa Interna de Rendimiento/Retorno.....	29
1.2.6 Contabilidad de costos	29
1.2.7 Análisis financiero	30
1.2.8 Relación costo-beneficio	31
1.2.9 Aplicación del costo-beneficio	31
1.3 Antecedentes.....	32
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y METODOS.....	38
2.1 Recolección de Residuos Sólidos de Café.....	39

2.1.1 Acondicionamiento del residuo de café	39
2.1.2 Caracterización fisicoquímica del residuo de café	39
2.2 Hidrocarbonización	40
2.2.1 Condiciones de operación del proceso	40
2.3 Análisis técnico-económico del proceso de hidrocarbonización	41
2.3.1 Análisis de poder calorífico	41
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	53
3.1 Recolección de Residuos de Café Gastado (RCG)	53
3.2 Caracterización del Residuo de Café Gastado	57
3.3 Carbonización hidrotérmica del café gastado	58
3.4 Proceso de carbonización hidrotérmica	70
3.5 Balance Energético del Reactor Hidrotérmico de Alta Presión	70
3.6 Análisis de los costos energéticos del proceso de hidrocarbonización térmica ..	73
3.7 Equipos de hidrocarbonización térmica	74
3.7.1 Análisis técnico-económico del proceso de hidrocarbonización a diferentes escalas	78
CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES	86
BIBLIOGRAFÍA	87

Lista de Figuras

Figura 1. 1 Resumen de los principales residuos generados en las etapas del procesamiento del café. Nota: Aguas residuales de lavado de café (ARLC), Aguas residuales de pelado de café (ARPC), Aguas residuales de mucílago de café (ARMC), Aguas residuales de fermentación de café (ARFC) (Campos et al., 2021).	11
Figura 1. 2 Condiciones del proceso de conversión hidrotermal (Khan et al., 2019).....	13
Figura 1. 3 Variación del contenido de OFG con respecto a la temperatura de tratamiento hidrotérmica (Jain and Srinivasan, 2016).	18
Figura 1. 4 Hidrólisis de la Celobiosa (Fang et al., 2018).....	19
Figura 1. 5 Proceso de evaluación de proyectos (Valencia, 2011).	25
Figura 2. 1 Metodología para la investigación	38
Figura 2. 2 Bomba calorimétrica y sus componentes	42
Figura 2. 3 Elementos de la bomba calorimétrica, marca P.A. Hilton LTD, modelo C200	44
Figura 2. 4 Wattímetro Steren 2019.....	51
Figura 3. 1 Proceso de producción de hidrocarbón	53
Figura 3. 2 Cafetería donde se recolectaron uno de los residuos de café para la producción de hidrocarbón.....	55
Figura 3. 3 Café utilizado con sus respectivas características dentro del empaque.....	56
Figura 3. 4 Reactor Hidrotérmico.....	58
Figura 3. 5 Grafica de producción de biogás (Café Toka Premium)	59
Figura 3. 6 Grafica de producción de biogás Cafiver House Blend).....	60
Figura 3. 7 Grafica de producción de biogás (Café Lunas de Café Artesanal).....	60
Figura 3. 8 Monitoreo de café "A" (a) g PH y (b) g PS	64
Figura 3. 9 Monitoreo de café "B" (a) g PH y (b) g PS	65
Figura 3. 10 Monitoreo de café "C" (a) g PH y (b) g PS	65
Figura 3. 11 Monitoreo de sólidos volátiles y sólidos totales "A" (Café Toka Premium)	67
Figura 3. 12 Monitoreo de sólidos totales y sólidos volátiles "B" (Café Cafiver House Blend)	68
Figura 3. 13 Monitoreo Sólidos Totales y Sólidos Volátiles "C" (Café Lunas de Café Artesanal)	69

Lista de Tablas

Tabla 1. 1 Países con mayor producción de café en 2016/17 (en miles de 60 kg-bulto) (ICO, 2017).....	5
Tabla 1. 2 Composición de pulpa de Café Arábica y Café Robusta.....	10
Tabla 1. 3 Condiciones de síntesis y distribución de productos en proceso termoquímicos ..	12
Tabla 1. 4 Condiciones de reacción y su efecto en las características del hidrocarbón (Kambo and Dutta., 2015)	16
Tabla 1. 5 Análisis Elemental de carbón hidrotérmico y muestra activada (Veltri et al., 2020).....	21
Tabla 2. 1 Determinaciones Analíticas de los residuos de café y de hidrocarbonización.....	40
Tabla 2. 2 Parámetros de operación en CHT.	41
Tabla 2. 3 Valores de poder calorífico aceptables	45
Tabla 2. 4 Variación de temperatura respecto al tiempo.....	46
Tabla 2. 5 Valores obtenidos en el Calorímetro AC600	47
Tabla 3. 1 inventario de cafeterías en la zona centro de Orizaba, Veracruz. México (2023).....	54
Tabla 3. 2 Caracterización fisicoquímica del residuo de café en promedio	57
Tabla 3. 3 Volúmenes de bioaceite generado.....	61
Tabla 3. 4 Análisis Fisicoquímico del carbón hidrotérmico (Café Toka Premium).....	62
Tabla 3. 5 Análisis Fisicoquímico del carbón hidrotérmico (Café Cafiver House Blend).	63
Tabla 3. 6 Análisis Fisicoquímico del carbón hidrotérmico (Café Lunas de Café Artesanal). ..	63
Tabla 3. 7 Flujo energético del proceso de hidrocarbonización	71
Tabla 3. 8 Balance energético a partir de la relación de energía y consumo	72
Tabla 3. 9 Costos energéticos de la carbonización hidrotérmica	73
Tabla 3. 10 Relación de energía y costos a partir del valor promedio.....	73
Tabla 3. 11 Costos de combustibles y poder calorífico aportado	74
Tabla 3. 12 Lista de equipos comerciales y características operativas	74
Tabla 3. 13 Cálculo detallado para costos de equipo (Marzbali et al., 2021).	79
Tabla 3. 14 Flujos masicos y costos de adquisición	79
Tabla 3. 15 Costos de equipos instalados	80
Tabla 3. 16 Costo total directo.....	80
Tabla 3. 17 Costos indirectos	81
Tabla 3. 18 Inversión de capital total para el proceso de CHT.....	81
Tabla 3. 19 Suposiciones para estimar flujos de efectivo	82
Tabla 3. 20 Flujos netos de efectivo escala industrial.....	83
Tabla 3. 21 EMBLI Global Diversified Subindices (Chase, 2023)	83
Tabla 3. 22 VPN Escala industrial	84

NOMENCLATURA

Abreviatura	Significado
%	Porcentaje
°C	Grados Celsius
CHT	Carbonización hidrotermal
CIT	Costos indirectos totales
CO ₂	Dióxido de carbono
Cp	Capacidad calorífica
h	Hora
g	Gramo
kg	Kilogramo
MJ	Megajoules
MXN	Moneda nacional mexicana
PC	Poder Calorífico
pH	Potencial de hidrogeno
Ph	Peso húmedo
Ps	Peso seco
RCG	Residuos de café gastado
ST	Sólidos totales
SV	Sólidos Volátiles
TMAR	Tasa mínima de retorno
VPN	Valor presente neto

INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha aumentado el consumo mundial de café, lo cual es un beneficio para mi país, un país con una gran producción de café y un consumo muy grande. La producción de café en México es una de las áreas más importantes porque es un cultivo estratégico que genera empleos y oportunidades de crecimiento y es apoyado por pequeñas y medianas economías. La empresa cuenta con más de 500 000 productores en 15 estados del país, con un consumo per cápita de 1.4 kg/año. En México, Chiapas es el principal estado productor, con el 41.0 % de la producción nacional, seguido de Veracruz (24.0 %) y Puebla (15.3 %) reportado por SADER, (2018).

Sin embargo, al hacer este tipo de producción, los residuos y desechos surgen naturalmente durante la producción del producto final. En las empresas que consumen café, los residuos de lixiviados de café, o más comúnmente conocidos como café molido, permanecen sin gestionar o eliminar. Por lo tanto, el proyecto de investigación se enfoca en la propuesta de aprovechamiento de los residuos de lixiviados de café a través de un proceso de hidrocarburo que aprovecha ciertas propiedades que lo hacen ventajoso para desarrollar energía a partir del poder calorífico que pueda presentar el producto de este proceso de biotransformación (Afolabi *et al.*, 2020). Durante este proceso, los residuos se colocan en condiciones económicamente viables, a diferencia de otros procesos u otros métodos cuyas características operativas pueden resultar en altos costos de operación y mantenimiento. Por lo tanto, dependiendo de los resultados que se obtengan, se propondrá un escalado real basado en una base computacional, que beneficie al medio ambiente y a quienes buscan aprovechar dichos desechos, también se utilizan equipos comerciales para la carbonización de aplicaciones. En un entorno controlado, se genera un análisis completo correspondiente (Ruiz *et al.*, 2008).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar las condiciones de operación del proceso de hidrocarbonización de los residuos de la percolación del café como fuente de bioenergéticos y realizar un análisis integral para definir su viabilidad a escala real.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.- Realizar la evaluación de los residuos generados a partir de la percolación de café a nivel nacional.
- 2.- Analizar las condiciones de la hidrocarbonización en función del poder calorífico y el costo de procesamiento.
- 3.- Realizar un análisis técnico-económico del proceso de hidrocarbonización a escala real proponiendo una base de producción.
- 4.- Evaluar equipos comerciales para la aplicación de la carbonización.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Producción mundial del café

Uno de los cultivos más importantes a nivel mundial es el café (*Coffea arabica* L.), el cual es particularmente importante en América Latina, como consecuencia de su aporte de divisas, a partir de la venta de granos en el mercado internacional (Pérez-Sánchez *et al.*, 2022; Canet-Brenes *et al.*, 2016). El café se cultiva comercialmente en cuatro continentes y se consume en los siete pero la mayor parte del consumo de café ocurre en los países desarrollados del mundo ubicados en el Norte Global, como Finlandia, Noruega, los Países Bajos, Alemania y Estados Unidos a la cabeza. La población de países subdesarrollados, es decir, el Sur Global, bebe menos café generalmente, alrededor del 30 %, sin embargo, estos lo cultivan, producen y exportan dicha bebida basada en el grano de café o cereza. Después del petróleo crudo, el café es el producto más comercializado mundialmente. En los últimos años, la producción mundial total de café se ha sido constante, mientras que la demanda de café ha aumentado significativamente. El consumo doméstico de café es menor, alrededor de 3.3 millones de sacos de café verde por año. El resto, que ronda los 7.7 millones, o alrededor del 70 % de su producción, tanto en forma de granos verdes como de café tostado, se exporta a Alemania, Estados Unidos, Japón e Italia. Del total de las exportaciones, alrededor del 25-30 % son café arábico de alta calidad. La tecnología de comercio electrónico puede desempeñar un papel cada vez más importante en el desarrollo de una industria agrícola con un trasfondo tradicional. La tendencia de la demanda mundial de café de alta calidad es que cumpla con los estándares de sostenibilidad, protección del medio ambiente y el comercio justo. (Carroll, 2022; Panggabean and Arsyad, 2021; Morris, 2018).

En la Tabla 1.1 se observan los diez países que se posicionan como los mayores productores de café a nivel mundial en los últimos 17 años a partir del año 2000.

Tabla 1. 1 Países con mayor producción de café en 2016/17 (en miles de 60 kg-bulto) (ICO, 2017).

País	Tipo	Años								
		2000/01	2005/06	2010/11	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17
Brasil	A/ R	31.31	32.93	53.42	50.59	55.42	54.69	52.299	50.38	55
Vietnam	R/A	14.84	13.84	20	26.5	23.4	27.61	26.5	28.73	25.5
Colombia	A/ R	10.4	12.56	8.52	7.65	9.92	12.16	13.339	14	14.5
Indonesia	R/A	6.98	9.15	9.12	10.64	11.51	11.26	11.418	12.31	11.49
Etiopia	A	3.11	4.77	7.5	6.79	6.23	6.52	6.625	6.71	6.6
Honduras	A	2.66	3.2	4.33	5.88	4.68	4.57	5.258	5.76	5.93
India	R/A	5.02	4.56	5.03	5.23	5.3	5.07	5.45	5.8	5.33
Perú	A	2.67	2.48	4.06	5.37	4.45	4.33	2.883	3.3	4.22
Uganda	R/A	3.4	2.17	3.26	3.11	3.91	3.63	3.744	3.65	3.8
Guatemala	A/R	4.94	3.67	3.95	3.85	3.76	3.18	3.31	3.42	3.5
10 países más productores		85.35	89.39	119.23	125.64	128.61	133.07	130.82	134.1	135.88
Mundial		113.67	111.39	139.6	147.9	149.62	152.22	148.73	151.56	153.86

Nota 1 Tipo de café R refiriéndose a Robusta y A para Arábica.

Con lo anterior, este sector tiene un impacto significativo en millones de personas alrededor del mundo, desde agricultores hasta consumidores. Los resultados muestran que el comercio mundial de café ha crecido constantemente desde el año 2000 (Pancsira, 2022). Durante la cosecha de café 2020/21 se estima que serán generados aproximadamente 11.4 millones de toneladas de subproductos sólidos y una mayor cantidad de aguas residuales. Actualmente no hay usos verdaderamente agregados para estas especies potencialmente amenazantes para el medio ambiente, sin embargo, se ha investigado que los subproductos son una fuente de una gama de compuestos bioactivos y podrían explorarse con posibles beneficios económicos y ambientales (da Silva *et al.*, 2022).

A pesar de esto, la industria del café sostenible ha experimentado una expansión constante en las últimas décadas, debido a la demanda emergente y los valores de los consumidores. Las corporaciones cafeteras han invertido en este segmento de mercado, participando en iniciativas de múltiples partes interesadas a través de las cuales buscan controlar las definiciones de sostenibilidad y asegurar la cadena de suministro, lo cual ha provocado una creciente crisis del café en México, presentando deficiencias entre los valores de sostenibilidad económica, social y ambiental (Renard, 2022)

1.1.1 Producción de café en México

Uno de los principales productos en la agricultura a nivel mundial es el café, en México dada la geografía nacional, es posible cultivar y producir distintas variedades de café, las cuales han sido clasificadas entre las mejores del mundo, siendo 15 estados representantes de la república, en una superficie de 737 376 ha (SIAP, 2014). México ha sido presentado como el octavo productor a nivel mundial de café, a pesar de que, India y México ocuparon el quinto y sexto lugar respectivamente durante la etapa de producción del 2000 al 2012 (OIC, 2014; Medina-Meléndez *et al.*, 2016; Vichi *et al.*, 2016). En México, la industria de cafés especiales ofrece diferentes productos y servicios especializados: productores, tostadores, pequeñas empresas familiares, franquiciados nacionales e internacionales, grandes y crecientes conglomerados (heladerías, pastelerías, tiendas de conveniencia, cines, etc.). Las cafeterías en el país son una industria dinámica y en crecimiento que ha sufrido muchos cambios y ha continuado madurando desde sus inicios. Desde el fondo de la cadena, el tostado, el procesamiento, el manejo del grano y las prácticas agrícolas requieren mejoras (Fujigaki, 2016).

De acuerdo con investigaciones del comercio internacional del café, en el periodo de enero - mayo del 2012 se reportó que las exportaciones de café arábica fueron de 75,223 toneladas, 592 toneladas de Café Robusta, y otros tipos de café de 7,673 toneladas, haciendo un volumen bruto de 83,488 toneladas, que fueron directamente al mercado internacional. En el periodo mencionado, se consolidó la cantidad de 5,671 millones de pesos como valor total de las exportaciones realizadas. Las grandes producciones de café son gracias a la gran venta del producto a países como Estados Unidos, Alemania, Bélgica, Francia, Italia, Puerto Rico, Canadá, Japón, Países Bajos y Australia. La República Mexicana cuenta con 12 estados productores de café, donde los más destacados son Chiapas con un 40 % de la producción de café, Puebla 21 % Veracruz el 20 %, Oaxaca 10 %, y el resto de los estados conglomeran el 9 % restante (Figueroa-Hernández *et al.*, 2015). Existen diferentes variedades de café cultivado en México, donde se pueden encontrar alrededor de 120 variedades de este grano, las más destacadas son las siguientes: Criollo o Typica, gracias a su gran adaptación al terreno mexicano, Bourbon, donde su principal cultivador es Chiapas presentado características de crecimiento buenas con respecto al tipo de tierra y altura de donde se encuentra, Caturra que se origina posiblemente de

una mutación de los cafetos tipo Bourbon, el café Pluma Hidalgo es una tropicalización del café Typica, es cultivada en las zonas de montaña de Oaxaca, el café Garnica es desarrollada en Veracruz, otros cafés como Catimor, Maragogipe, Mundo Novo y Garien también se producen en tierras mexicanas (Soco, 2021).

1.1.2 Consumo de café

La industria del café ha experimentado dos tendencias principales: el desarrollo del consumo especial de café por parte de los conocedores y la importancia de la sostenibilidad. Sin embargo, hasta donde sabemos, a pesar de la creciente relevancia análoga de ambas tendencias, la literatura sobre cómo la sostenibilidad se ha entrelazado con el consumo de los conocedores es bastante limitada. En relación con los consumidores conocedores a través del enfoque de las teorías de la práctica social, es probable que implementen y perciban la sostenibilidad de manera distinta al mercado de masas dominante internacionalmente. Desde una perspectiva comercial, actualmente se tiende a fomentar prácticas respetuosas con el medio ambiente en los consumidores de café, así como sobre cómo crear estrategias de marketing más sostenibles (Bartoloni *et al.*, 2022).

A la par del consumo selectivo de conocedores, la sostenibilidad y los problemas éticos han comenzado a afectar gravemente a la industria del café al desarrollar la existencia de un consumidor preocupado por el medio ambiente y la sociedad. En concreto, la creciente concientización sobre los problemas medioambientales y sociales está empujando a los consumidores a cambiar sus comportamientos y valores de compra habituales, exigiendo prácticas más sostenibles y una comercialización justa a través del abastecimiento ético y la minimización de energía y producción de desechos (Guimarães *et al.*, 2019; Samoggia and Riedel, 2018). Algunos analistas han relacionado los patrones de consumo con el crecimiento de las cadenas de restaurantes, junto con los cambios en la Organización Internacional de Comercio de Alimentos, que durante casi 30 años ha estado bajo la influencia de los productores y algunos consumidores bajo el auspicio de la Organización Internacional del Café (OIC) el llamado Convenio Internacional del Café. El control del comercio internacional se desarrolló a través de un sistema de cuotas, que fijaba la cantidad máxima de café que un país productor podía exportar a los consumidores. Estas cuotas se determinan en función de la producción de cada país y su capacidad en las reuniones de la OIC, siendo Brasil el país de mayor impacto, uno

de los principales productores y exportadores del mundo. Los cambios en los hábitos de consumo con la globalización no afectan negativamente a la cultura tradicional del café en países donde el consumo tradicional es de gran importancia. Como resultado, aunque las tradiciones del café aún se mantienen, las nuevas tendencias en el consumo al aire libre pueden ser preferenciales. además, las marcas globales también se benefician de las características locales de los países al desarrollar sus estrategias de marketing. Por lo tanto, se vuelve benéfico para el desarrollo comercial de los establecimientos de bebidas locales y multinacionales incluir bebidas tradicionales en sus menús y aumentar el número y la variedad de estas bebidas promoviendo productos como el café y el té a turistas extranjeros. A través de esto, se espera que la sostenibilidad se convierta en un valor dominante en los nuevos patrones de consumo internacional (Yildirim y Karaca, 2022; dos Santos *et al.*, 2021; Akaki *et al.*, 2006).

De igual forma se ha reportado que, la mayor parte del consumo es el café instantáneo; alrededor del 65.0 % a nivel mundial. En países como Brasil, donde el consumo per cápita anual es cuatro veces el de México, el 95.0 % del consumo corresponde a café tostado y molido. México cuenta como uno de los principales exportadores de café en un área de comercio justo (*fair trade*). La mayoría de los agricultores mexicanos que producen productos con atributos éticos están empobrecidos y tienen un nicho potencial en el mercado interno, que comprende 2.9 millones de hogares en el decil superior de la economía y recibe el 34.0 % del ingreso nacional. Fomentar el consumo interno de café es fundamental para toda la cadena productiva de productos, consumidores y actividades cafeteras, contribuyendo al desarrollo de la economía nacional (Aragón-Gutiérrez *et al.*, 2013). Uno de vértices del crecimiento en el consumo de café, se debe a la alta popularidad que este ejerce al tener presentaciones más sencillas y fáciles de utilizar, como es el sistema de capsulas, el cual contiene cantidades de ciertos tipos de café, para que este de como resultado una variedad de estilos y sabores únicos, un estudio de mercado mostro que hombres y mujeres de estatus económico medio alto, que comprenden una edad de entre 28 y 50 años son las personas que consumen grandes cantidades de esta presentación del producto, ya que el utilizar este diseño, vuelve más rápido el proceso además de conservar el sabor específico. Se infiere que la forma de tomar café en México ha cambiado de modo que ya no solo recibes una taza de café tostado y que su única función era terminar un desayuno en paquete o como complementación de este. Ahora es completamente diferente: los consumidores

eligen entre opciones, rangos, formatos, nombres, orígenes y distintas presentaciones o tipos de tostados (Figueroa-Hernández *et al.*, 2015).

Del mismo modo, la preparación de café a través de técnicas simples (preparación en frío, olla a presión, cafetera tradicional) se considera una opción más sostenible en comparación a las cápsulas precargadas con café. Para los consumidores conocedores, la preparación más sencilla sigue siendo la más respetuosa con el medio ambiente, ya que no producen tantos residuos como las monodosis de café individuales y producen un mejor café, a pesar de esto, se siguen produciendo grandes cantidades de residuos de la percolación (Bartoloni *et al.*, 2022).

1.1.3 Residuos de café

El sector cafetalero presenta una tendencia al aumento del consumo y a la caída de los precios internacionales como materia prima. Existe la necesidad de una estrategia para la disminución del impacto de los altos costos para los productores y mantener la competitividad del producto. En este contexto, la disposición adecuada de las aguas residuales del café (ARC) puede ser una alternativa para mitigar el impacto ambiental cuando se desechan sin tratamiento. Las ARC se pueden emplear para generar una fuente de ingresos extra para los caficultores utilizándolas en la industria alimentaria, farmacéutica o cosmética. El manejo adecuado de estas aguas residuales, así como el conocimiento de su composición y toxicidad, podría ayudar a identificar soluciones al comienzo de la cadena de procesamiento, sin embargo, hasta la fecha, no hay informes que hayan discutido esta problemática. Por esta razón, es necesario el estudio de soluciones efectivas, verificando aspectos económicos, sociales y sustentables, enfocándose en las tendencias en el uso de los residuos del café, que estimulen la investigación de un nuevo subproducto sustentable, que permita la generación de ingresos extra. El impacto puede variar entre los productores de café y sus desechos, creando oportunidades de mitigación. A partir de la perspectiva de que el café llegue a un enfoque totalmente sustentable, cabe señalar que aún existen subproductos que no han recibido popularidad para ser reutilizados. Es probable que esto se deba a una subestimación del potencial de los residuos, o por el protagonismo que han recibido otros subproductos en la actualidad. El agua utilizada en el lavado del café, que tiene un potencial económico y sustentable, permanece científicamente inexplorada como subproducto. Una de las principales preocupaciones en relación con la sostenibilidad de la cadena productiva del café implica la recuperación de una gran cantidad de sus subproductos generados

incluidos más de 10 millones de toneladas de residuos sólidos, junto con grandes cantidades de aguas residuales y residuos de cultivos. Entre los residuos sólidos, la cáscara es la primera que se genera. Representa el 39 % del peso fresco o 29 % de la materia seca del fruto. La composición típica de las pulpas de café arábica y robusta se muestra en la Tabla 1.2 (Campos *et al.*, 2021; Echeverría and Nuti, 2017; Kasuya *et al.*, 2015; Oliveira and Franca, 2015;).

Tabla 1. 2 Composición de pulpa de Café Arábica y Café Robusta

Café Arábica Típica		Café Robusta	
Componente	Teórico (Base Seca) (%)	Componente	Teórico (Base seca) (%)
Materia Seca	93.07	Extracto no nitrogenado	57.9
Carbohidratos	74.1	Fibra Cruda	27.7
Extracto no nitrogenado	59.1	Azúcares Reducidos	12.4
Fibra Cruda	15.1	Proteína Cruda	9.2
Proteína Cruda	8.25	Sustancia Péptica	6.5
Cenizas	8.12	Taninos	4.5
Contenido de Agua	6.93	Cenizas	3.3
Taninos	3.7	Azúcares no Reducidos	2
Potasio	3.17	Lípidos	2
Extracto Etéreo	2.5	Ácidos Clorogénicos	1.61
Nitrógeno	1.32	Cafeína	0.54
Cafeína	0.75		
Calcio	0.32		

Tomando en cuenta los posibles residuos producidos durante la producción del café se presenta la Figura 1.1. Como se puede observar, el procesamiento húmedo es uno de los que genera una mayor cantidad de efluentes y residuos sólidos húmedos en relación con otros métodos, es decir, es un método de mayor impacto ambiental en relación con la producción de residuos con alto contenido orgánico.

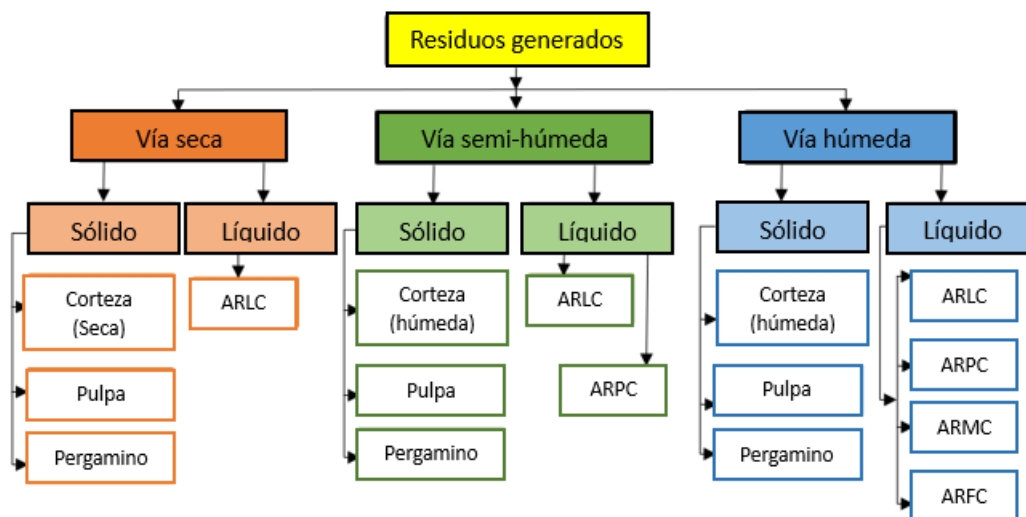


Figura 1. 1 Resumen de los principales residuos generados en las etapas del procesamiento del café. Nota: Aguas residuales de lavado de café (ARLC), Aguas residuales de pelado de café (ARPC), Aguas residuales de mucílago de café (ARMC), Aguas residuales de fermentación de café (ARFC) (Campos *et al.*, 2021).

En cuanto al consumo nacional, en México, se reporta que el café instantáneo se utiliza en café tostado y molido en forma de 60.0 % y 40.0 %. El consumo de café en México ha ido en aumento en los últimos años, y según investigaciones realizadas por consultoras, los mexicanos prefieren las variedades solubles debido a su practicidad (Ortiz-Martínez, 2020). Sin embargo, debido a la apertura de más cafeterías, el café molido ha ganado mayor reconocimiento y favoritismo, acercando a los consumidores a nuevas experiencias y conocimientos sobre esta cultura de bebidas (SADER, 2018). De tal modo que, para satisfacer esta alta demanda, la industria se ha convertido en generadora de grandes cantidades de residuos de café, siendo los más importantes el café de desecho o café gastado y la pulpa de café, sin ningún tipo de tratamiento empleado (Ortiz-Martínez, 2020).

1.1.4 Aprovechamiento de residuos en los procesos termoquímicos

Uno de los mayores impactos medioambientales es el uso de la biomasa lignocelulósica debido a sus grandes cantidades de producción. De modo que genera problemas en la gestión del residuo, existen especies frutales que no son aprovechadas y que generalmente se destinan a un sitio de composta para su disposición final, tal es el caso de la biomasa producida a través de la percolación del café. Las materias primas que se consideran como “residuos” contienen un potencial energético biotecnológico enorme, debido a que pueden desarrollarse numerosos productos que tengan un valor

agregado mediante un proceso químico, físico y/o enzimático (Diwan *et al.*, 2020). En los últimos años la comunidad científica se ha concentrado en buscar y desarrollar nuevos métodos de revalorización de esta biomasa y cada proceso depende en gran parte de numerosos factores que afectan principalmente la viabilidad económica, entre las principales rutas se encuentran las conversiones químicas, termoquímicas, bioquímicas o microbianas, las cuales son utilizadas en la producción de alcoholes, Diesel, gasolina, metano, aceite, combustibles sólidos y productos químicos finos (Vu *et al.*, 2020). Para el uso de esta biomasa surgen diversas problemáticas debido a la naturaleza física como lo es el material fibroso, baja densidad, un poder calorífico mínimo y un alto contenido de humedad. Por lo que se determinó en los últimos años el estudio de convertir biomasa lignocelulósica en adsorbente carbonoso como ruta de revalorización, de tal forma que posea propiedades físicas y químicas que sean provechosas tales como, una gran área específica, porosidad, alta cantidad de sitios activos y capacidad de adsorción. Dentro de los materiales carbonosos que generalmente son sintetizados mediante una conversión termoquímica de la biomasa son: la pirolisis, torrefacción, gasificación y la carbonización hidrotermal, cada una de las condiciones de reacción y la distribución de productos en cada uno de los procesos termoquímicos se resumen en la Tabla 1.3 (Yip *et al.*, 2010; (Abdelhadi *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2015; Kambo *et al.*, 2015).

Tabla 1. 3 Condiciones de síntesis y distribución de productos en proceso termoquímicos

Proceso	Pirolisis rápida	Gasificación	Torrefacción	Carbonización Hidrotermal	Pirolisis lenta
Producto predominante	Líquido	Gas	Sólido	Sólido	Mezcla
Temperatura (°C)	500-1000	600 - 900	200 - 300	180 - 260	300 - 650
Tiempo de residencia	< 2 s	10 - 20 s	10 - 60 min	1 - 16 h	1 - 12 h
Velocidad de calentamiento (°C/min)	500 - 700	50 - 100 °C/s	10 - 15	5 - 10	5 - 7
Sólido (%)	12	10	80	50 - 80	35
Líquido (%)	75	5	0	5 - 20	30
Gas (%)	13	85	20	2 - 5	35

1.1.5 Carbonización Hidrotérmica

La Carbonización Hidrotérmica (CHT) es un proceso termoquímico que convierte la biomasa seca o con alto contenido de humedad y agua en un compuesto sólido similar al carbono llamado biocarbón al someter la biomasa húmeda a temperaturas moderadas (180 °C a 260 °C) en condiciones específicas de presión autógena (10 – 50 bar) en un reactor cerrado. Es importante destacar que la CHT forma parte de la subcategoría de procesos hidrotermales donde se encuentra también la licuefacción hidrotermal (HTL) y la gasificación hidrotermal (HTG) como se muestra en la Figura 1.2. Cada uno de estos procesos realiza la conversión de la biomasa generando un producto predominante: HTC (hidrocarbón de alta calidad), HTL (bioaceite oxigenado) y HTG (hidrogeno y metano) (Sánchez-Silva, 2022).

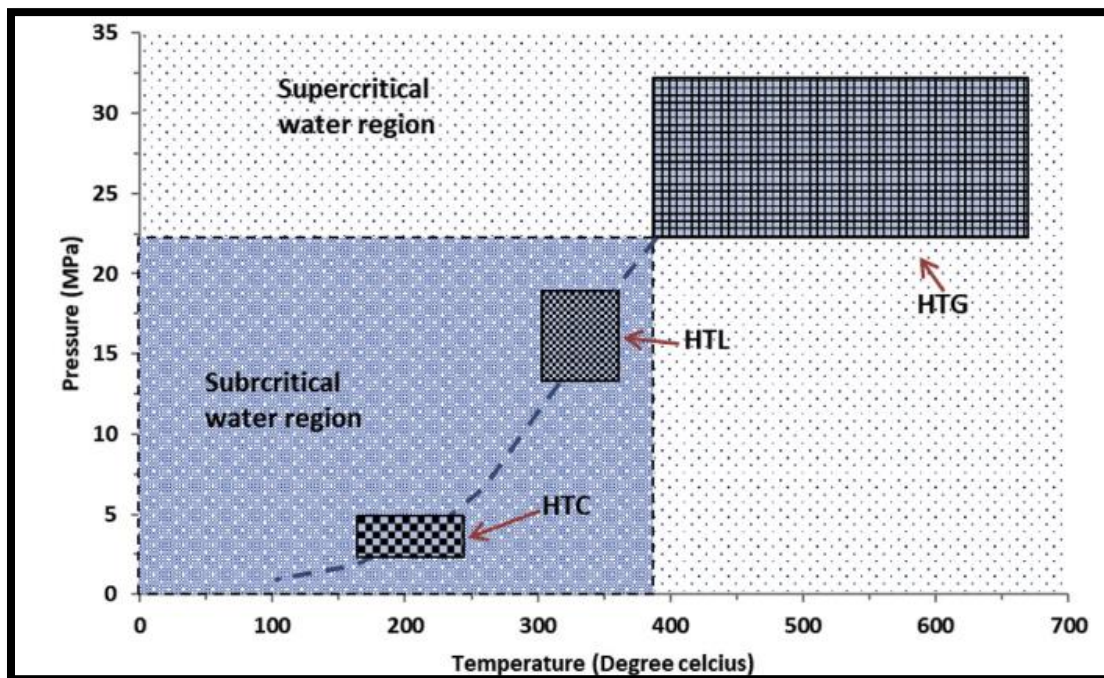


Figura 1. 2 Condiciones del proceso de conversión hidrotermal (Khan *et al.*, 2019).

Es una tecnología limpia que elimina de forma sostenible los residuos sin el uso de vertederos y contribuye a la gestión ecológica dentro de las empresas sin necesidad de utilizar mucha energía para secar las materias primas antes o durante el procesamiento de materiales. El biocarbón puede mejorar

las propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos, aumentando así el rendimiento de los cultivos. Además, el biocarbón o también llamado biochar con un área de superficie específica alta se puede usar como una herramienta de remediación en el suelo para adsorber contaminantes orgánicos e inorgánicos como pesticidas y metales pesados, reduciendo la infiltración en las vías fluviales. Para evaluar su desempeño se determinan índices de combustión, índices de inflamabilidad e ignición e inflamabilidad volátil. Una vez que se determina la idoneidad del carbón para la combustión, los problemas de transporte, manejo, almacenamiento y costos se analizan y resuelven parcialmente a través de un proceso de densificación, cuya salida es combustible de carbón y combustible en forma de briquetas, gránulos o tuberías. Mide parámetros como la resistencia a la compresión, la higroscopicidad y el índice de resistencia al impacto para diferentes tipos de carbón seleccionados (Jeguirim *et al.*, 2019; Nava-Pacheco, 2021).

1.1.6 Material carbonoso derivado de la borra de café

Lo que se denomina como borra de café son desechos del café después de consumirlo, este es el residuo sólido obtenido tras la extracción sólido-líquido, en el que la parte líquida se liofiliza para obtener café soluble conforme a lo descubierto en los desarrollos de investigación (Laurio and Slater, 2020). La borra de café constituye el 50.0 % del peso total de los residuos de la producción de café. En 2020 se produjeron unas 833.000 toneladas de café, de las cuales 416.000 toneladas terminaron como café molido, según la Federación Colombiana de Cafeteros (Campos-Vega *et al.*, 2015). Este residuo ha sido utilizado previamente como fuente para la extracción de carbohidratos y fenoles, así como para la producción de carbón activado para la remoción de metales pesados de fuentes de agua, entre otras aplicaciones, y constituyen la síntesis de materiales carbonosos y sus prometedoras opciones como electrodos para super-capacitores (Blinová *et al.*, 2017; Verhagen, 2019). La utilización de residuos de borra de café para el desarrollo de carbón activado mediante CHT, el cual se ha considerado poco sistemática, por lo que, sumando a la necesidad de profundizar en sistemas de almacenamiento de energía, el cual exige la realización de estudios más específicos en este ámbito. Con respecto al desarrollo de los materiales producto de la CHT, los análisis termogravimétrico y elemental han confirmado la obtención de un material mucho más carbonizado con la carbonización hidrotérmica a 250 °C durante 6 h, en tanto que a 200 °C durante 6 h se ha logrado un mayor rendimiento de reacción para la obtención de materiales carbonosos a partir de la utilización de la

borra de café (Arredondo-Ferrer *et al.*, 2022). Sin embargo, la obtención de materiales carbonosos a partir de las biomásas mediante CHT son utilizadas debido a su gran disponibilidad, volumen y su composición lignocelulósica. La industria de café denomina a la borra de café como desecho, este es un residuo sólido producido por la extracción sólido-líquido, en la cual la fracción líquida se liofiliza para así, dar lugar a la obtención del café soluble (Laurio and Slater., 2020). La borra de café representa un aproximado del 50 % del peso de residuo total de la producción de café (Campos-Vega *et al.*, 2015). De acuerdo con la Federación Colombiana de Cafeteros, en el 2020 se llegó a producir 833 mil toneladas de café, siendo la borra del café 416 mil, es por ello que el residuo se ha utilizado con anterioridad como una fuente para la extracción de fenoles y carbohidratos, tanto para la producción de carbones activados para la remoción de metales pesados de fuentes hídricas, entre otras diferentes aplicaciones (Verhagen, 2019; Blinova *et al.*, 2017).

1.1.7 Factores importantes en el desarrollo de la hidrocarbonización

La CHT es una transformación termoquímica que convierte precursores ricos en materiales lignocelulósicos en materiales con mayor contenido de carbono (hidrocarbón) mediante reacciones como deshidratación, descarboxilación, condensación, etc. (Libra *et al.*, 2011). Esta técnica utiliza temperaturas entre 180 °C - 350 °C y presión autógena, y dado que utiliza agua como disolvente, presenta el comportamiento típico de los disolventes no polares y una reducción de la constante dieléctrica. Como resultado, se pierden componentes volátiles sustanciales de las materias primas, lo que da lugar a propiedades de porosidad y área superficial que pueden surgir durante los tratamientos térmicos posteriores (Kruse and Dinjus, 2007).

En CHT se pueden utilizar, o no, catalizadores y se pueden controlar parámetros como temperatura, tiempo de reacción, relación agua/biomasa, tamaño de partícula, pH o presión descrito por las investigaciones realizadas (Axelsson *et al.*, 2012). En la literatura existen informes detallados que evalúan el efecto de estos parámetros en la síntesis de materiales carbonosos, aunque se basan en la obtención de diferentes propiedades texturales, entre ellas la morfología (partículas esféricas o esferas de carbono coloidal) o área superficial superior a 600 m² g⁻¹ y desarrollo de porosidad nativa de acuerdo con lo descubierto. Sin embargo, existen pocos estudios sistemáticos sobre los efectos del tiempo y la temperatura sobre la cantidad de carbono fijado obtenido y el rendimiento de la reacción. Por otro lado, considerando su disponibilidad, volumen y composición lignocelulósica, la

biomasa es un precursor ampliamente utilizado para la obtención de materiales carbonosos vía CHT. (Chen *et al.*, 2009; Hu *et al.*, 2010; Donar *et al.*, 2016). De acuerdo con la naturaleza de la biomasa y las condiciones de reacción, dan como resultado en las propiedades fisicoquímicas y rendimiento del hidrocarbón, como se ha mencionado anteriormente, en la Tabla 1.4 se muestran distintas condiciones de reacción y el efecto que estas generan dentro del hidrocarbón.

Tabla 1. 4 Condiciones de reacción y su efecto en las características del hidrocarbón (Kambo and Dutta., 2015)

Aumento en el parámetro	Áreas BET y porosidad	Porcentaje de sólido (%)	Grado de deshidratación y descarboxilación (relaciones C/H y C/O)
Temperatura de reacción alta (HRT)	Aumenta hasta 230 °C, un aumento adicional muestra un efecto negativo	Disminuye	Disminuye
Tiempo de reacción (RRT)	Disminuye	Disminuye	Aumenta (Mecanismo de reacción muy complejo)
Presión (P)	Disminuye (generalmente no controlada)	Aumenta	-
Catalizador (CO ₂ , N ₂ , Aire, Sales, Ácidos, etc.)	Aumenta hasta 230 °C, un aumento adicional muestra un efecto negativo	Disminuye	Aumenta (Mecanismo de reacción muy complejo)
Contenido de humedad de la materia prima	No afecta	No afecta (el proceso en si requiere agua)	No afecta
Pretratamiento (tamaño de partícula)	El efecto es relativamente mucho menor que la pirolisis	Disminuye (el efecto es significativo)	-
Carga solida (Relación entre la materia prima y el medio de reacción)	Disminuye	Disminuye (proporciones bajas, se utilizan para la producción de bioaceites)	Disminuye

1.1.7.1 Variaciones de tiempo

El tiempo es una variable que a menudo se manipula durante un período de respuesta que va desde días hasta minutos y segundos en el CHT (Teong and Zhang, 2014). Los tiempos de residencia más

largos tienden a favorecer la sobrepolimerización al tiempo que reducen el número y la variedad de grupos funcionales oxigenados (OFG), lo que favorece la adición de grupos oxigenados estables mediante deshidratación o condensación aldólica (Jain and Srinivasan, 2016). El tiempo de reacción varía según la complejidad de la materia prima HTC y su concentración. El tiempo de residencia también afecta el tamaño de las partículas y su distribución en el carbón: a mayor tiempo de reacción, mayor tiempo de polimerización, y por lo tanto el tamaño de las esferas, aunque esta variable parece tener efecto. En el valor máximo posible debido a la finalización de la reacción Hay un límite asintótico al diámetro del efecto significativo. El rendimiento de carbono también se ve afectado por el tiempo de residencia, de nuevo cuanto más largo es el tiempo de residencia, menor tiende a ser el rendimiento de carbono por masa de materia prima (Romero *et al.*, 2014).

1.1.7.2 Variaciones de temperatura

Según lo investigado la temperatura mantenida para la carbonización hidrotérmica es un factor que afecta el resultado de las reacciones de degradación (es decir, reacciones iónicas o radicales) y es fundamental para la tasa de carbonización. Las reacciones iónicas prevalecen a temperaturas más bajas, mientras que la ruptura de enlaces homolíticos ocurre a temperaturas más altas (Cabrera *et al.*, 2019). Las altas temperaturas dan como resultado la formación de una amplia gama de productos y mayores rendimientos de gas. En comparación con la temperatura, la presión tiene un efecto relativamente pequeño en la reacción (Jain and Srinivasan, 2016). De acuerdo con lo reportado, a medida que aumenta la temperatura del proceso, el porcentaje de producción de carbono disminuye alrededor de un 20.0 % (Nizamuddin *et al.*, 2015). La razón de la disminución en el rendimiento de sólidos con el aumento de la temperatura puede ser:

- Aumentar la descomposición de los alimentos primarios
- Por descomposición secundaria de residuos sólidos
- Alta solubilidad de los componentes en hidrolizado
- Reacciones de desoxigenación (reacciones de descarboxilación y deshidratación).
- Transformación de sustancias volátiles.

Varios estudios han demostrado una mayor porosidad del carbono cuyos precursores sufren carbonización hidrotérmica en el rango de 180 a 240 °C debido al aumento de grupos carbonilo. Un mayor aumento de la temperatura aumenta la estabilidad química y estructural, lo que reduce la

porosidad del carbón activado reportado por (Falco *et al.*, 2013). Las temperaturas de carbonización hidrotérmica más altas conducen a un mayor contenido de OFG. Algunas características son:

- Tiempos de permanencia más cortos
- Mayor concentración de sustrato
- Mayor contenido de lignina

La Figura 1.3 muestra la tendencia general del contenido de OFG con el aumento de la temperatura de la carbonización hidrotérmica (Jain and Srinivasan, 2016).

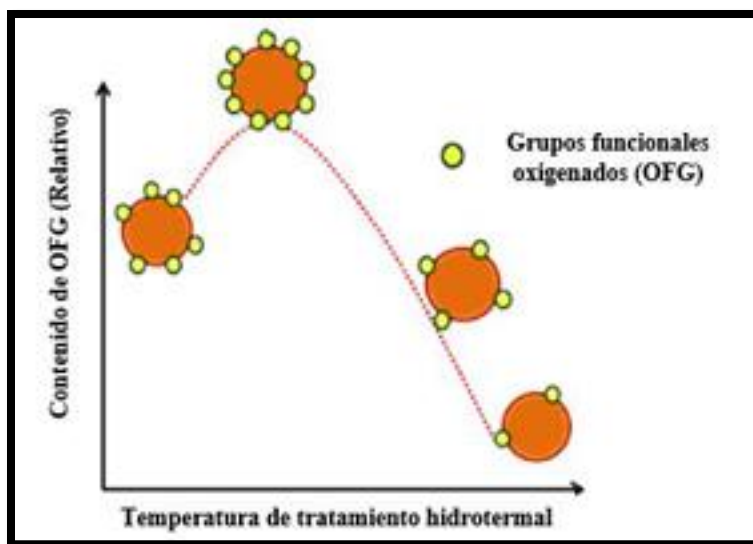


Figura 1. 3 Variación del contenido de OFG con respecto a la temperatura de tratamiento hidrotérmica (Jain and Srinivasan, 2016).

1.1.7.3 Función de la presión en el proceso

Se ha reportado que por CHT se genera biomasa introducida al agua, o se puede controlar agregando gas). Como resultado se obtiene una fracción carbonosa conocida como hidrocarbonizado, que contiene una mayor proporción de carbono que el material de partida. Los gases no se ventilan al exterior, cuando el proceso se lleva a cabo en un recipiente sellado, los gases producidos por el proceso crean presión en el reactor, acelerando el proceso (Álvarez-Murillo, 2017).

1.1.8 Fases del proceso de la hidrocarbonización

Durante la carbonización hidrotérmica, la biomasa sufre un reordenamiento estructural a través de la

degradación en productos sólidos, líquidos y gaseosos. La composición química y el aspecto físico de los productos sólidos (carbón) dependen de las materias primas utilizadas (Lu and Savage, 2015). Las diferencias en la composición química pueden explicarse por los mecanismos de reacción que ocurren durante la carbonización hidrotérmica, que incluyen hidrólisis, deshidratación, descarboxilación, aromatización y recondensación. Aunque estos procesos suelen ocurrir en este orden, no se ejecutan consecutivamente, sino que ocurren simultáneamente y están interrelacionados durante la carbonización hidrotérmica. De todos estos procesos, la hidrólisis tiene la energía de activación más baja y es el primer paso iniciado en el proceso de carbonización hidrotérmica (Fang *et al.*, (2018)).

1.1.8.1 Hidrólisis

Como se muestra en la Figura 1.4, la hidrólisis altera la estructura química de la biomasa al romper los enlaces éster y éter de bio-macromoléculas con moléculas de agua. Este proceso produce fragmentos de oligosacáridos y lignina que pasan a la fase líquida. Estos fragmentos se hidrolizan a fenoles, pero el sacárido 8 puede iniciar otras vías y sustancias químicas durante HTC (Fang *et al.*, 2018).

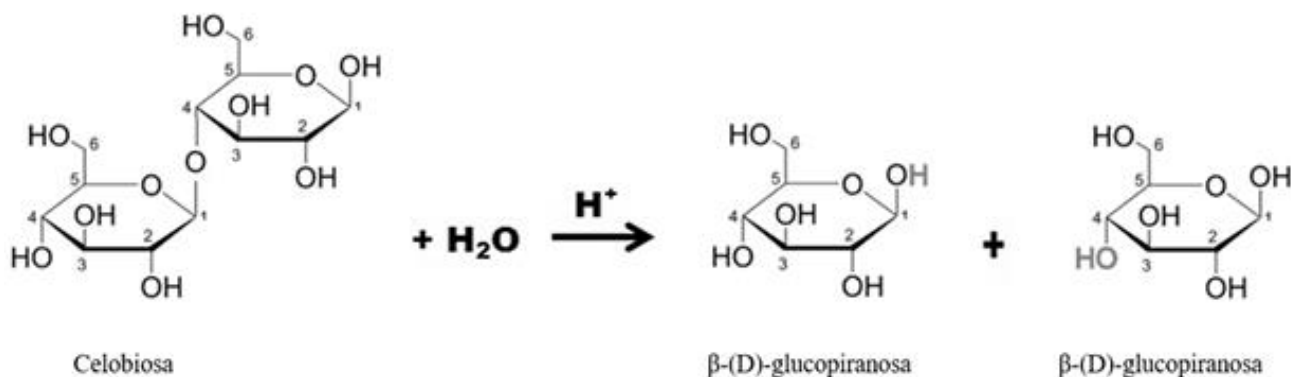


Figura 1. 4 Hidrólisis de la Celobiosa (Fang *et al.*, 2018).

1.1.8.2 Deshidratación

La deshidratación es el proceso donde se elimina el agua de la matriz de biomasa, causando la eliminación de los grupos hidroxilo, la síntesis de la deshidratación es la creación de moléculas más grandes de monómeros más pequeños donde se libera una molécula de agua. Esto se puede utilizar en la creación de polímeros sintetizados tales como tereftalato de polietileno, o la creación de moléculas biológicas grandes tales como polímeros y triglicéridos del hidrato de carbono (Yokoyama, 2020).

1.1.8.3 Descarboxilación

La descarboxilación es responsable de la eliminación de CO₂ de la biomasa, durante la cual se eliminan los grupos carboxilo (Fang *et al.*, 2018).

1.1.8.4 Polimerización

La polimerización es el proceso mediante el cual se fabrican los polímeros y, durante el proceso de polimerización, se pueden perder algunos grupos químicos de cada monómero y el polímero no siempre conserva las propiedades químicas o la reactividad de la unidad monomérica (Speight, 2018).

1.1.8.5 Aromatización

La aromatización se produce debido a la deshidratación y descarboxilación. Los grupos funcionales con dobles enlaces como (C=O y C=C) reemplazan los grupos hidroxilo y carboxilo enlazados en la matriz de biomasa. La reacción de aromatización depende básicamente de la temperatura y el tiempo de residencia (Cayo-Reinoso, 2018). El compuesto furfural producido por estos dos mecanismos es posteriormente hidrolizado y descompuesto en ácidos, aldehídos y fenoles. El ácido resultante luego cataliza la liberación de elementos inorgánicos de la matriz de biomasa (Fang *et al.*, 2018).

1.1.9 Productos finales de la hidrocarbonización

El proceso de carbonización hidrotérmica conduce a la obtención de tres tipos de productos: carbón sólido, gas carbonizado, producto sólido y emulsión de aceite hidrotérmico biocarbonizado en agua., conocidos como hidrocarburos o hydrochars, son ricos en carbono y alcanzan el mayor grado de carbonatación, las sustancias húmicas generalmente se producen en menor cantidad, que son sólidos de color marrón oscuro o claro con menor grado de carbonatación (Mendoza *et al.*, 2021). De acuerdo con la información consultada este último es el producto de carbono del proceso HTC, generalmente como un polvo de color marrón oscuro, insoluble en solventes comunes, y todos los azúcares en forma de hexosas se degradan a HMF durante la carbonización hidrotérmica (Titirici *et al.*, 2008; Erazo-Mendoza *et al.*, 2021). Este se condensa en carbono con características morfológicas similares (esferas y partículas interconectadas hasta 2000 nm) independientemente de la complejidad inicial del carbohidrato. El carbón hidrotérmico obtenido a partir del jugo de naranja tiene un alto contenido de carbono y grupos funcionales oxidados (OFGs), los cuales son importantes para su posterior activación; también tiene una alta densidad de microporos (diámetros de partículas elementales) en materiales porosos entre 3 y 5 μm y mesoporos (materiales porosos con diámetros de partículas elementales que van desde 3-5 μm hasta un máximo de 50 μm ., resultando en hasta 1725 m^2/g en promedio. Además, el diámetro promedio de sus partículas esféricas es de 5 μm . La Tabla 1.5 es un resumen de la composición de la muestra de carbón hidrotérmico de jugo de naranja, contiene carbón hidrotérmico activado (KOH), este cuadro solo es mostrado como referencia de los resultados del hidrocarbón en el cítrico seleccionado (Veltri *et al.*, 2020).

Tabla 1. 5 Análisis Elemental de carbón hidrotérmico y muestra activada (Veltri *et al.*, 2020)

Muestra	C	H	N
Carbón Hidrotérmico	76.21	5.32	5.65
Muestra Activada	76.36	0.75	13.67

1.1.10 Ventajas y desventajas del proceso de hidrocarbonización

De acuerdo con lo reportado en investigaciones anteriores se registraron los siguientes puntos:

-
- Proceso simple y de bajo costo. En comparación con otros procesos de procesamiento de biomasa, como la pirólisis, las temperaturas requeridas son mucho más bajas y no se requiere una atmósfera inerte. El proceso no requiere un catalizador y debido a que hay una pequeña cantidad de oxígeno presente al comienzo de la reacción, se produce muy poco CO₂.
 - El proceso CHT produce mayores rendimientos de sólidos y más compuestos orgánicos solubles en agua que el proceso de pirólisis. Mediante el uso de la tecnología CHT, la estructura química del sólido resultante es más similar al carbono natural.
 - El proceso es exotérmico y autocatalítico por la formación de iones hidronio, que aceleran el proceso de carbonización a partir de la descomposición primaria de la biomasa.
 - Como se mencionó anteriormente, el proceso se lleva a cabo en un recipiente hermético, por lo que no se libera gas al exterior. En cambio, estos gases aumentan la presión en el reactor y aceleran la reacción.
 - Durante la pirólisis, los costos aumentan debido a la producción de alquitrán que requiere limpieza. En el caso de la alquilación, la fase líquida se diluye y se puede retirar fácilmente del reactor para su uso posterior.
 - La biomasa al alquilar no requiere un proceso de secado previo. El factor predefinido hasta el momento es la necesidad de utilizar materiales con un contenido de humedad en torno al 10.0 %, lo que hace que la biomasa húmeda se descarte por el coste del necesario proceso de secado previo.
 - En el proceso HTC, el tiempo de reacción, el reactor, la concentración y el uso de aditivos y estabilizadores son variables de entrada que permiten modificar las propiedades del carbón para funciones específicas.
 - Menor potencial de deterioro durante el almacenamiento debido a la reducción del contenido de humedad de equilibrio presente en los sólidos resultantes.
 - El balance energético del proceso es muy atractivo. Como se mencionó anteriormente, la reacción es exotérmica y requiere una energía de calentamiento mínima en comparación con otros procesos termoquímicos.
 - El tratamiento hidrotérmico es una técnica que proporciona reacciones simples y formación controlada de partículas. La desventaja es que algunos subproductos formados por la reacción

deben eliminarse después de la reacción, así como la preparación previa de los precursores (Contador-Pérez, 2018; Zamora-Valencia, 2020).

1.1.11 Implementación en áreas de aplicación del hidrocarbón

Las dos características más importantes del carbón hidrotérmico son el área de superficie específica y la distribución del tamaño de poro (Falco *et al.*, 2013). Las cualidades de estos materiales definen al carbón hidrotérmico activado como apto para la investigación y aplicaciones industriales, aunque el proceso de obtención y activación implica elevados costes y su aprovechamiento a gran escala aún está en desarrollo. Entre las aplicaciones más representativas se encuentran la síntesis de nanopartículas de carbono fluorescentes con grupos funcionales amino especificados (Sahu *et al.*, 2012); La carbonización de sacarosa asistida por microondas y la carbonización de glucosa en micelas inversas se utilizaron para fabricar nanopartículas de carbono fluorescentes sin pasivación superficial, estos se suman a aplicaciones más tradicionales, como los hidrocarburos como electrodos para supercondensadores y componentes optoelectrónicos. En particular, el desarrollo de un supercondensador de alto rendimiento y alta resistencia a partir de paja de desecho industrial de la que se ha obtenido carbono mediante el proceso CHT, y el uso del carbono hidrotérmico como absorbente de contaminantes en aplicación de agente de soluciones acuosas (Fang *et al.*, 2018).

1.2 Análisis Integral

El análisis integral tiene la capacidad de observar y analizar aspectos cualitativos y cuantitativos relacionados con la situación financiera y económica de una empresa, para lo cual se enfatiza en el acoplamiento de este tipo de análisis a la investigación y desarrollo de la CHT (Amat, 2008). De esta forma, se puede realizar un análisis para diagnosticar las fortalezas y debilidades del tema, por ejemplo: aspectos estratégicos, áreas operativas y técnico-económicas. Sobre esta base, se menciona que se puede realizar un análisis técnico y económico del proceso y se presenta un caso de producción (González, 2018). En otras palabras, el análisis integral se centra en un conjunto de medidas cuidadosamente seleccionadas que se aplican de una manera que logra y comunica una visión compartida de la estrategia futura de una organización (Rubén *et al.*, 2018). De esta manera, busca aprovechar las características fundamentales del enfoque para lograr un equilibrio integral entre

los diferentes factores necesarios para alcanzar los objetivos estratégicos y en este caso cumplir con los objetivos planteados. Por ejemplo, el Sistema de Control Estratégico (SCE), que se implementa a través de la visión económico-financiera, análisis estructural, de gestión y estratégico de activos intangibles, así como herramientas de modelado que simulan y cuantifican la escala interna de cada visión de acuerdo con lo reportado, de esta forma se podrá realizar el análisis técnico - económico del proceso de la CHT (Ruiz *et al.*, 2008). La eliminación de residuos agrícolas y biorresiduos sólidos de frutas y verduras es perjudicial para el medio ambiente, ya que su descomposición crea gases de efecto invernadero tóxicos. Por lo que, el estudio completo de alternativas con una visión de las propiedades de recolección de residuos y almacenamiento o producción de bioenergéticos es crucial para enfocar el camino hacia una economía circular y sostenible ante los procesos que generan residuos que pueden ser aprovechados (Sahu *et al.*, 2022). El desarrollo de residuos ha incrementado de forma muy acelerada y además de su nula gestión, es uno de los principales problemas ambientales y sociales con mayor impacto, el cual ha recibido gran importancia para los países desarrollados y en vías de desarrollo, (Montiel-Bohórquez *et al.*, 2021). Todo aquel producto que ha concluido su uso primario es desechado, cualquier objeto o masa que no tiene valor, no tiene algún uso o presenta algún defecto, incluido los desechos sólidos municipales (RSU), los residuos peligrosos, aguas residuales, desechos radioactivos, etc. Cabe destacar que un tipo primario de desecho son los RSU, el cual es un subproducto del estilo de vida moderno, que ha crecido rápidamente logrando una cantidad de 2.010 millones de toneladas alrededor de todo el mundo (Mazzoni *et al.*, 2017). Existen varios métodos de conversión de residuos, en los que las tres tecnologías más comunes son la conversión térmica (incineración, pirólisis, gasificación, etc.), la conversión biológica (digestión anaeróbica, compostaje, etc.) y el vertido con recuperación de gas (Quin *et al.*, 2021). Estudios recientes han demostrado la viabilidad de nuevos diseños evaluando las perspectivas termodinámicas mediante rendimientos económicos, basándose en plantas de incineración de residuos, por lo que el análisis integral de transformación de residuos a bioenergéticos presenta una tendencia hacia la evaluación de distintos escenarios (Chen, 2022).

1.2.1 Indicadores de Rentabilidad

En un proceso de evaluación de proyecto, se relacionan métricas de rentabilidad como, el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y, en algunos casos, el valor económico agregado (EVA)

cumplen distintos objetivos que se desglosarán más adelante cumpliendo con un proceso como se muestra en la Figura 1.5. Es importante analizar estos conceptos para integrarlos completamente en el proceso de evaluación de proyectos, de esta forma, adecuar y desarrollar este concepto en el proceso de la carbonización hidrotérmica en la evaluación del caso específico. En el campo empresarial las decisiones de inversión son muy importantes porque son el medio para implementar las estrategias y lograr los objetivos que se han propuesto. El documento principal y básico para el análisis de la decisión de inversión es el proyecto de inversión, es por ello que la evaluación de proyectos permite medir las beneficios de la inversión desde el punto de vista económico, se estiman los probables ingresos y costos en un tiempo determinado, ya sea corto, mediano o largo plazo, la comparación de los valores genera un conjunto de indicadores que muestran la rentabilidad y determinan la conveniencia de ejecutar el proyecto, de tal modo, establecer los parámetros necesarios para evaluar de la CHT (Valencia, 2011). La reducción de costos y el aumento de la eficiencia son objetivos muy importantes para todos los proveedores de servicios, lo que es posible gracias a un estudio exhaustivo de la demanda en esta área. La intensidad de las actividades en específico vinculadas a la producción y los servicios aumenta constantemente debido a la ineficiencia de crecimiento de la economía y la mayor interconexión de las cadenas de suministro. La importancia de realizar estudios de investigación en el área de transportación radica en al menos el 30 % de los costos de toda la cadena de suministro provienen (Kovács, 2017).

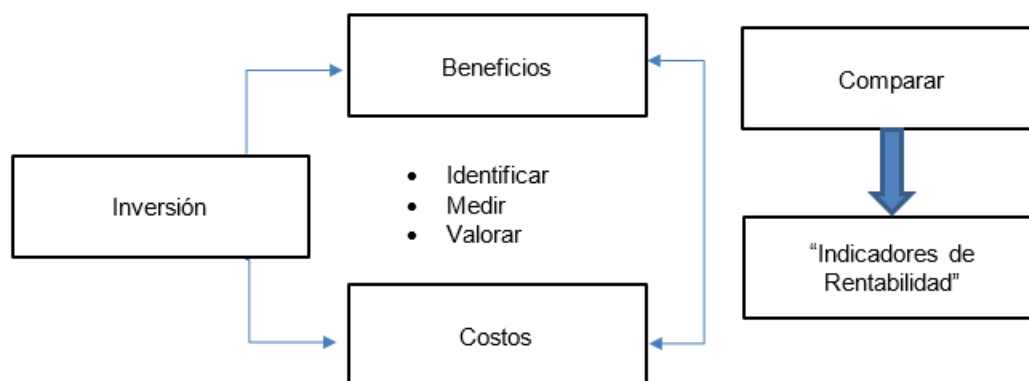


Figura 1. 5 Proceso de evaluación de proyectos (Valencia, 2011).

1.2.2 Valor Actual Neto

El Valor Actual Neto (VAN) o Valor Presente Neto (VPN) de un proyecto es el valor del flujo de caja neto propuesto, entendido como la diferencia entre los ingresos y gastos periódicos. En otras palabras, el VAN es el valor presente de los flujos de efectivo a la tasa de rendimiento requerida de su proyecto en comparación con su inversión inicial. En términos prácticos, es un método para calcular el Retorno de la Inversión (RI), para un proyecto o gasto. Al observar todo el dinero que espera obtener de la inversión y convertir esos rendimientos en un valor monetario actual, puede decidir si el proyecto es factible o no. Para actualizar estos flujos netos se utiliza una tasa de descuento denominada tasa esperada o de reemplazo/oportunidad, que es una medida de la rentabilidad mínima que requiere el proyecto para permitir recuperar la inversión, cubrir los costos y obtener los beneficios. Es importante tener en cuenta que el VAN calculado de esta manera convierte los ingresos y los gastos en equivalentes de período cero. Si se desea seleccionar otro período de referencia, con ello obtener el Valor Actual Neto que brinden el uso de los residuos de la percolación de café para el proceso de la carbonización hidrotérmica, por lo que la ecuación debe ajustarse en consecuencia de este caso, además de considerar los dos aspectos siguientes (Mete, 2014; Gallo, 2014).

Existen distintos métodos para la evaluación económica relacionada con el costo de ciclo de vida “LCC” (por sus siglas en inglés Life Cycle Cost) han ido emergiendo a lo largo de los años (Haugbølle *et al.*, 2018). Cada método tiene sus particularidades, basándose en ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Los métodos comunes de evaluación económica con LCC incluyen los métodos de Período de Recuperación Simple, Período de Recuperación Descontado, Costo Anual Equivalente, Tasa de Retorno Interno, Ahorro Neto, y Valor Actual Neto (Schade, 2009). Sin embargo, existen demasiados métodos de evaluación económica, que tienden a generar confusión en la aplicación (Xie *et al.*, 2022). Si el valor actual neto de un proyecto independiente es mayor o igual a 0, se acepta el proyecto, de lo contrario, se rechaza el proyecto. Entre los proyectos mutuamente excluyentes, se debe elegir uno u otro, y se debe elegir el proyecto con el VAN más alto. Un VAN negativo no significa necesariamente que no se obtuvieron beneficios, sino que demuestra cualquiera de los siguientes: no se lograron beneficios o esos beneficios no cubrieron las expectativas del proyecto. Desafortunadamente, el VAN no establece claramente en qué casos no encontramos una ganancia, no hubo ganancia o falta de ganancia, solo indicó que el proyecto debe ser rechazado. Por tanto, un VAN igual a 0 no significa que no haya beneficios, sino que apenas se cumplen las expectativas del

proyecto. Asimismo, un VAN superior a 0 indica que el proyecto generará ingresos incluso después de cumplir con las expectativas, adquiriendo así una determinación de seguimiento de estudio en la aplicación de este método para los procesos de hidrocarbonización (Mete, 2014).

Una de las constantes que se busca en una empresa es el crecimiento, muchas de ellas carecen de innovaciones, ya que las oportunidades que pueden existir llegan a ser muy limitadas, incluso si la empresa presenta innovaciones exitosas, el factor de riesgo que es el fracaso, aun puede ocurrir si la empresa solo se enfoca las experiencias de éxito, dejando a un lado la cultura de innovación sostenible y continua. Es por ello, que, si se desea producir una innovación con los aspectos anteriores, se requiere el liderazgo en innovación y la gestión de proyectos debe relacionarse con una clara noción de cada uno de los roles que se estén involucrando en el proceso. En otras palabras, la innovación define que es lo que se debería hacer, mientras que la gestión del proyecto determina si es posible realizar dichas innovaciones en el proyecto. Las empresas han desarrollado áreas específicas dedicadas al desarrollo de innovación y gestión de ideas; por lo que se deben establecer criterios de evaluación de proyectos interpretando cada una de las afectaciones que pueden surgir a partir de estos cambios. De tal forma que requiere el involucramiento de los gerentes de proyecto y personal de innovación quienes comprendan las deficiencias del sistema evaluado y la innovación sea exitosa a largo plazo, implicando también la comprensión de la interfaz con el marketing, personal operativo y de desarrollo, clientes y potenciales clientes (Kerzner, 2022).

1.2.3 Valor Económico Agregado

A diferencia de las métricas de rentabilidad, que muestran información parcial, el Valor Económico Agregado (EVA) es una medida absoluta del desempeño global de una empresa basada en la creación de valor. Por ejemplo, el Retorno de la Inversión (ROI) muestra la generación de utilidades asociada a una inversión y tiene en cuenta el costo de financiar sus gastos pasivos, pero debe compararse con el costo de oportunidad de los fondos de los inversionistas para saber si coincide con sus expectativas; mientras que EVA incluye todos los aspectos anteriores en su análisis. En toda actividad empresarial se utilizan recursos, los cuales tiene un costo, por lo que, para que un negocio sea viable se deben generar ingresos que cubran todos los costos (incluido el financiamiento), de ser así se crea valor para la empresa, de lo contrario se destruye valor porque los recursos de otras fuentes deben utilizarse

para cubrir el déficit, con ello se pueden establecer los rubros necesarios para evaluar de manera económica el proceso en cuestión. Por su concepto simple y fácil aplicación, surge de comparar la rentabilidad alcanzada por una empresa con el costo de los recursos utilizados para lograr dicha rentabilidad (Valencia, 2014). Uno de los principales caracteres a tomar en cuenta en la actualidad, es el centrar las diferentes evaluaciones en factores humanos, políticos, legales y financieros en la toma de decisiones, en donde la utilización del esquema del Valor Económico Agregado permite gestionar y orientar las decisiones en diferentes nichos de oportunidad que pueden abarcar, brindando así una mejora en el proceso de venta e identificación de los distintos beneficios que pueden generarse, brindando un producto de mejor calidad y desempeño para el consumidor (López-Rodríguez *et al.*, 2019).

1.2.4 Diferencias entre el Valor Económico Agregado y el Valor Actual Neto

El concepto de valor actual neto es medir la riqueza generada al invertir a través del proyecto, que es un método lógico similar al EVA, mide tanto la generación de riqueza como la generación de valor, la diferencia radica en su aplicación, el VAN mide la entre períodos del proyecto valor sobre un horizonte Inter temporal (horizonte de tiempo), mientras que EVA mide el valor sobre un período de tiempo dado. Además, el VAN es un indicador de rentabilidad en el análisis de inversiones, que se enfoca en la economía, mientras que el EVA es un indicador de gestión financiera relacionado con aspectos contables, por lo que el primero debe ser utilizado en la evaluación de proyectos y en segundo el análisis financiero que fue reportado en la investigación (Valencia, 2014). Uno de los principales objetivos en las empresas es la sostenibilidad, de modo que, para lograr llegar a ella se debe tener una excelente gestión de residuos sólidos para que puedan ser aprovechables, ya que como se puede observar hoy en día, el crecimiento continuo de la población a nivel mundial está provocando un crecimiento industrial, urbano y actividad económica que impulsa el incremento de los residuos sólidos urbanos (RSU). En el 2016 la producción global de residuos sólidos fue de 2.010 millones de toneladas, y se estima que aumente hasta 3.400 millones de toneladas en el año 2050 (Kaza *et al.*, 2018). Se ha mostrado en algunos estudios una tendencia a la evaluación de un modelo que optimice el aprovechamiento de los residuos mediante la examinación de las nuevas tecnologías, como lo es el biosecado previo al tratamiento para mejorar el valor calorífico de los residuos. Por lo tanto, la red económica del aprovechamiento de RSU busca la maximización del valor presente neto (VAN), ya

que el aumento de este valor es considerado un objetivo de sostenibilidad económica (Saif *et al.*, 2022).

1.2.5 Tasa Interna de Rendimiento/Retorno

La tasa interna de rendimiento o también llamada de retorno (TIR), es otro criterio para considerar, el cual es usado para las decisiones de inversión y financiamiento de proyectos. Se define como una tasa de descuento que sea igual al valor presente de los ingresos y el valor presente de sus gastos, la tasa de interés es utilizada para calcular el Valor Actual Neto, haciéndolo igual a cero. El argumento básico en apoyo de este enfoque es que expresa, en una sola cifra, la rentabilidad generada por los fondos invertidos en el proyecto, resumiendo las condiciones y ventajas. Dado que no depende de las condiciones prevalecientes en los mercados financieros, se denomina tasa interna de retorno, a un número interno o intrínseco del proyecto, es decir, una medida de la tasa de retorno de los fondos retenidos en el proyecto, y no depende de nada más que del flujo de caja, de esta manera se pueden conocer los rendimientos de la carbonización hidrotérmica, sabiendo lo beneficioso de este proceso, dando valores de rendimiento económico y medibles en el proyecto, además de brindar toma de decisiones con respecto a los resultados obtenidos. El cálculo de la TIR puede resultar muy complejo si la vida útil del proyecto excede los dos períodos. En ese caso, la solución requiere considerar a la TIR como incógnita en la ecuación del Valor Actual Neto, ya que ella tiene la particularidad de ser la única tasa que hace que el resultado de aquel sea igual a 0 (Mete, 2014). En estudios recientes se ha exhibido la importancia de los costos en el área ambiental, dando así un análisis a los residuos sólidos municipales como ejemplo que puede analizar dicho procedimiento adjudicándole un valor económico. El retorno económico se evalúa con base en el valor presente neto del costo de construcción y operación, además de considerar las áreas afectadas (impacto social) que estén en relación directa (Talang, and Sirivithayapakorn., 2022).

1.2.6 Contabilidad de costos

La contabilidad de costos debe considerarse un elemento de gestión clave en todas las actividades de planificación, control y desarrollo de estrategias, ya que proporciona las herramientas contables necesarias para permitir el correcto funcionamiento de ciertas etapas del proceso administrativo, como

las operaciones de planificación, control y evaluación. Durante la fase de planificación, la contabilidad de costes utiliza presupuestos para pronosticar el futuro. De esta manera, los costos futuros pueden determinarse con base en los materiales, sueldos, salarios y gastos generales de fabricación involucrados en la fabricación del producto. Estos pronósticos se pueden utilizar para determinar precios u optimizar las ganancias, teniendo en cuenta algunos determinantes poderosos en el mercado, como la competencia. Además, ayuda a la toma de decisiones al aumentar la capacidad de producción, fabricación o compra, arrendamiento o compra de una empresa o sus instalaciones, incluido el procesamiento adicional de productos, la reducción o el aumento de turnos. Cuando se habla de control, la contabilidad de costes se refiere al momento actual porque compara los resultados reales obtenidos con el presupuesto en la fase de planificación. En esta etapa se pueden identificar algunas deficiencias operativas que nos permiten maximizar las utilidades, por consiguiente, establecer valores económicos y técnicos en el proceso a investigar, como lo es la utilización de residuos hidrocarbonizados. Finalmente, la fase de evaluación implica un análisis crítico de los resultados realmente obtenidos, así como un análisis de los problemas que se presentan y las desviaciones asociadas a los resultados esperados con el fin de eliminarlos o aislarlos. originarlos. La fase de evaluación debe proporcionar a la gerencia recomendaciones para mejorar las actividades de planificación futuras, además de acciones correctivas para las operaciones actualmente en curso, lo que resulta en un análisis integral (González, 2015).

1.2.7 Análisis financiero

El estudio económico selecciona, registra, categoriza e informa todas las operaciones realizadas por las entidades económicas que pueden ser cuantificadas en términos monetarios. Proporciona el historial económico y financiero de la organización. Los estados financieros generados permiten a la dirección de la empresa tomar decisiones y brindar todas las herramientas necesarias para brindar a los accionistas y usuarios externos información relevante, veraz y oportuna, la aplicación este análisis brindan la capacidad de mejorar el proceso de la carbonización hidrotérmica mayor oportunidad de rentabilidad y costes económicos (González, 2015). Los análisis financieros ya han sido aplicados en el área ambiental, como lo es la gestión de residuos sólidos, que brindan una visión integral de los recursos involucrados, la disposición del residuos y la estructura de costos del servicio y del sistema utilizado, abriendo paso a la utilización de métodos más complejos para el análisis de todo lo que

conlleve el proceso de forma directa e indirecta, aun con esto, existe muy pocos estudios dedicados a este proceso, por lo que se abre una amplia área de investigación (Pinha and Sagawa., 2020). El análisis financiero permite estudiar cada uno de los factores beneficiosos y perjudiciales que tiene un proceso, ayudando así a la toma de decisiones a las empresas para tomar un camino correctivo, elaborando un análisis integral del desempeño financiero, mostrando cuales fueron las causas o posibles causas del problema (Burguete, 2016).

1.2.8 Relación costo-beneficio

Se ha registrado que el Análisis Costo-Beneficio (CBA) implica crear un marco para evaluar si, en un momento dado, el costo de una medida en particular es mayor que el beneficio derivado de ella. El costo de los beneficios permite predecir qué decisión es la más apropiada económicamente en un proyecto en particular (Aguilera-Díaz, 2017).

Implícita o explícitamente, el beneficio es difícil de calcular el tamaño de su producto beneficio, su cuantificación y evaluación no se reflejan, como en el caso del costo, este último es más fácil de calcular. Se debe considerar que tanto los costos como los beneficios forman parte del proceso de evaluación de alternativas para elegir la mejor decisión. Para el análisis costo-beneficio es una técnica formal para la toma de decisiones aplicable, clara, sistemática y racional, especialmente cuando se enfrentan alternativas complejas o tiempos de incertidumbre (Snell, 2011). Se menciona dentro de la investigación que “los últimos años han sido testigos de la aplicación del análisis costo-beneficio en diferentes sectores” (Francis, 1976). También se ha mencionado que el enfoque costo-beneficio no es del todo objetivo, proporciona un proceso tabular simple para proyectos con una fórmula que resta los costos asociados con el proyecto de la suma de los beneficios de implementar el proyecto, estas relaciones son de gran utilidad para el proceso de carbonización hidrotérmica, ya que considera todos los aspectos desde inicio a fin, dando a conocer aquellos factores para mejorar y evaluar el proceso de la hidrocarbonización. Los costos son calculados de manera diferente. Esto se dificulta por el uso de técnicas de valoración monetaria que pueden modelar y valorar elementos intangibles, como el costo de oportunidades perdidas, que pueden ser subjetivos (Cervone, 2010).

1.2.9 Aplicación del costo-beneficio

El estudio de costo-beneficio ha sido utilizado en diferentes áreas, se registra que históricamente el costo-beneficio ha estado asociado en los procesos de planificación y presupuestación del gobierno, y con el tiempo se ha aplicado a los aportes del sector privado. Actualmente, el análisis de costo-beneficio se utiliza para brindar una justificación detallada de los beneficios financieros de un proyecto que superan los costos.

La relación costo-beneficio, también definida como índice de utilidad neta, representa la evaluación de los procesos que dan lugar a la selección de los métodos de análisis y acción, que en este caso pueden ser aplicables en el proceso de hidrocarbonización térmica de los residuos de café, recibiendo valores económicos brindando también de la selección de mejores decisiones para establecer datos completos al analizar el procedimiento (Cervone, 2010).

Este procedimiento se ha visto en estudios como la gestión de los residuos de alimentos, el cual ofrecía un alto potencial para lograr la sostenibilidad si se realiza adecuadamente, sin embargo, si se manipula de forma inadecuada causa cargas ambientales significativas y negativas, del mismo modo que se realiza la evaluación del ciclo de vida (Lam *et al.*, 2018).

En otro estudio se inició el estudio en un caso particular, en Malasia, donde se desarrollaron indicadores de ecoeficiencia de los escenarios de gestión de residuos, dependiendo si eran vertederos abiertos, sanitario, compostaje o de reciclaje, donde también se evaluó la gestión de los residuos proporcionando así un índice de sostenibilidad (Chin *et al.*, 2022).

1.3 Antecedentes

Se ha usado microalgas verdes y azul-verdes, usando condiciones relativamente moderadas de temperatura (Aproximadamente a 200 °C), tiempo (<1 h) y presión (<2 MPa), las microalgas pueden de alguna manera transformarse en productos con Energía- ahorro de carbono de algas de calidad de carbón bituminoso (Hellmann *et al.*, 2010). Se ha registrado la evaluación de los impactos ambientales asociados con la carbonización de flujos de desechos municipales representativos (incluidos productos gaseosos y líquidos), evaluaron las propiedades físicas, químicas y térmicas de los hidrocarburos producidos e identificaron la energía de carbonización. Los resultados de los experimentos de carbonización por lotes mostraron que el 49.0 % - 75.0 % del carbono inicialmente presente se retuvo en el carbón, mientras que el 20.0 % - 37.0 % y el 2.0 % - 11.0 % del carbón se transfirió al carbón, a la fase líquida y a la fase gaseosa, respectivamente.

La composición de los hidrocarburos resultantes sugiere que las reacciones de deshidratación y descarboxilación ocurren durante la carbonización, dando como resultado estructuras con alta aromaticidad (Berg *et al.*, 2011). Se ha investigado la viabilidad de cultivar la microalga *Chlorella* utilizando nutrientes recuperados de la carbonización hidrotérmico (CHT).

Se aplicaron diferentes diluciones de 50, 100 y 200 al agua del proceso de reciclaje de CHT y se comparó el crecimiento de algas entre estos medios y los medios de crecimiento estándar BG-11. Las algas alcanzaron una concentración de biomasa de 0,79 g/L después de 4 días. Las algas eliminaron del 45.5 % al 59.9 %, del 85.8 % al 94.6 % y del 50.0 % al 60.9 % de la demanda de nitrógeno total, fósforo total y oxígeno químico en diferentes diluciones de agua de proceso, respectivamente, y el contenido de carbono de las algas cultivadas en agua de proceso aumentó en un 18.9 %, respectivamente y un 7.8 % de contenido de nitrógeno inferior al BG-11, lo que indica que son muy adecuados como materia prima para biocombustibles (Du *et al.*, 2012).

Respecto a la información reportada se utilizó un enfoque de evaluación del ciclo de vida para evaluar los impactos ambientales asociados con el CHT de los desechos de alimentos y la posterior combustión de los productos sólidos resultantes para la producción de energía, y para comprender cómo los parámetros y/o componentes relacionados con la carbonatación están asociados con el desperdicio de alimentos y la posterior combustión de hidrocarburos afecta el impacto ambiental del sistema. Los resultados de este análisis muestran que las emisiones de agua de proceso de CHT y la quema de hidrocarburos tienen el impacto ambiental más significativo en el sistema, lo que resulta en un impacto negativo neto en todas las fuentes de energía alternativa excepto la biomasa.

Estos resultados ilustran la importancia de la generación de energía a base de hidrocarburos, especialmente cuando se utilizan para compensar las fuentes de energía a base de carbón (Berg *et al.*, 2015). Se ha informado que el fluido obtenido del proceso de CHT también se utilizó para obtener caminatas de manooligosaccha de RCMG (la mayor cantidad se obtuvo después de 60 min a 185 °C) como promotor de una microflora intestinal más saludable (Pérez-Burillo *et al.*, 2019).

Se ha descubierto en un estudio de integración de masa y energía sobre el potencial de acoplamiento de CHT con digestión anaeróbica para el tratamiento de lodos de depuradora. Se construyeron seis

configuraciones de proceso propuestas que utilizan lodo primario, lodo secundario y mezclas para evaluar la generación neta de desechos, el destino de los nutrientes, la producción neta de energía y los posibles beneficios económicos. Los escenarios propuestos muestran reducciones de hasta 68.0 % y 66.0 % en sólidos totales y DQO, respectivamente (Aragón-Briceño *et al.*, 2020).

El uso de hidrocarburos como fuente de combustible aumentó la producción neta de energía por un factor de 10 en comparación con considerar el biogás solo como energía. Los rendimientos potenciales de estruvita oscilaron entre 0.02 kg y 0.06 kg por tonelada de lodo tratado. Cuando se consideran la estruvita y los hidrocarburos, el esquema con una temperatura de tratamiento térmico de 250 °C ofrece una mejor economía. Existen vacíos en la literatura respecto al uso del hidrocarbón como enmienda orgánica para mejorar suelos y plantas comestibles, dando así un paso más hacia una economía circular, proponen el uso del hidrocarbón de diferentes restos orgánicos domésticos como alternativa a la turba, comprobando su viabilidad mediante una prueba de germinación (Hernández-Soto *et al.*, 2019).

Los Residuos de Café Molido Gastado (RCMG) son un biorresiduo que contiene entre 13.0 % y 18.0 % de aceite, entre 14.0 % y 17.5 % de proteínas, aproximadamente 62.0 % de fibra dietética total y 1.3 % de contenido de cenizas (Alves *et al.*, 2017). Los RCMG se han utilizado con fines biotecnológicos (recuperación de compuestos bioactivos), energéticos (para obtener bioetanol, biodiésel y biogás) y medioambientales (carbón activado, enmiendas orgánicas) (Galanakis, 2017). El RCMG también se ha utilizado como sustrato en el proceso HC debido a su composición registrada en el reporte (Kim *et al.*, 2017; Afolabi *et al.*, 2020). Algunos grupos de investigación reportaron un producto con mayor contenido de carbono y contenido de carbono fijo debido a reacciones de descarboxilación, ya que entre el 60.0 % y el 84.0 % del carbono puede retenerse en el hidrochar expuesto en la investigación (Libra *et al.*, 2011).

También se reportó el efecto negativo del hidrochar RCMG en la germinación de las plantas y establecieron que se debía a la presencia de compuestos fitotóxicos. En el mismo sentido, también se encontró que el hidrocarbón de diferentes materias primas también inhibía significativamente la germinación de la cebada de primavera, lo que estaba estrechamente relacionado con los compuestos

de carbono orgánico disueltos absorbidos en el hidrochar de acuerdo con la investigación (Bargmann *et al.*, 2013). Además, se ha evaluado el potencial bioenergético de la pulpa de café para la evaluación de su factibilidad para el escalamiento de este procedimiento registrado (Ramos-Hernández *et al.*, 2021).

Los procesos de HTC no sólo permiten el uso de estas biomasas, sino que además el agua en sí puede ser de provecho durante el proceso. Esta línea de estudio ha sido ya desarrollada por otros trabajos, usando para ello: hierbas, algas o fangos, maíz, piel de tomate y residuos sólidos urbanos como lo menciona en el desarrollo de la investigación (Contador-Pérez, 2018).

Han existido distintos estudios y proyectos de investigación acerca del proceso de hidrocarbonización, los cuales han sido puestas a prueba en el área de Residuos Sólidos Urbanos, en las cuales se puede destacar el estudio de la caracterización fisicoquímica del hidrocarbón o también llamado hidrochar, el cual fue producido a partir de la fracción sólida de los residuos de frutas y verduras, además de residuos cítricos mostrando parámetros como humedad, pH, Sólidos Totales y Sólidos volátiles (Valeriano *et al.*, 2020).

También se han evaluado los factores que determinan variaciones en la producción de hidrochar, como lo es la temperatura, el tiempo de residencia, presión y contenido de humedad, afectan en cuanto a la conversión de la biomasa (Valeriano *et al.*, (2021). Se mencionan que los residuos de productos cítricos son beneficiosos para este tipo de investigación, ya que el estado de Veracruz es uno de los mayores productores de este artículo y a su vez el principal generador de residuos tal como se menciona en el reporte (Rosas-Mendoza *et al.*, 2020). Esta investigación tuvo como objeto el evaluar el producto de la hidrocarbonización a partir de un residuo cítrico como mejorador de suelos, dada la investigación (Valeriano *et al.*, 2021).

Existe información a partir de la investigación realizada, se utilizaron los residuos de la industria cafetera como enmiendas orgánicas de suelos para el mejoramiento de alimentos de origen vegetal, y emplearon el proceso de hidrocarbonización de los pozos de café o bien residuos de café, dando

por hecho que los pozos de café son un residuo con una clara vocación de economía circular, debido a la creación de productos de segunda generación y de alto valor añadido. Cabe mencionar que se recomienda el seguimiento de estudios que pongan a prueba la enmienda orgánica con diferentes procesos de transformación para evitar la fitotoxicidad. Sin embargo, provee un beneficio mayor al tener grandes cantidades en Carbón, de la misma forma se recomienda el uso de este tipo de producto sobre suelos que contengan un alto déficit de Carbono. Por su carácter fitotóxico, estos bio-productos no deben ser aplicados en grandes cantidades a los suelos, sino en dosis subtóxicas a modo de abonos funcionalizados con micronutrientes (bioquelatos), asociados a fertilizantes convencionales (Cervera-Mata (2022)).

CAPÍTULO 2

MATERIALES Y METODOS

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y METODOS

En la Figura 2.1 se muestra la metodología que se realizó con el propósito de cumplir con los objetivos mencionados al inicio de la presente investigación.

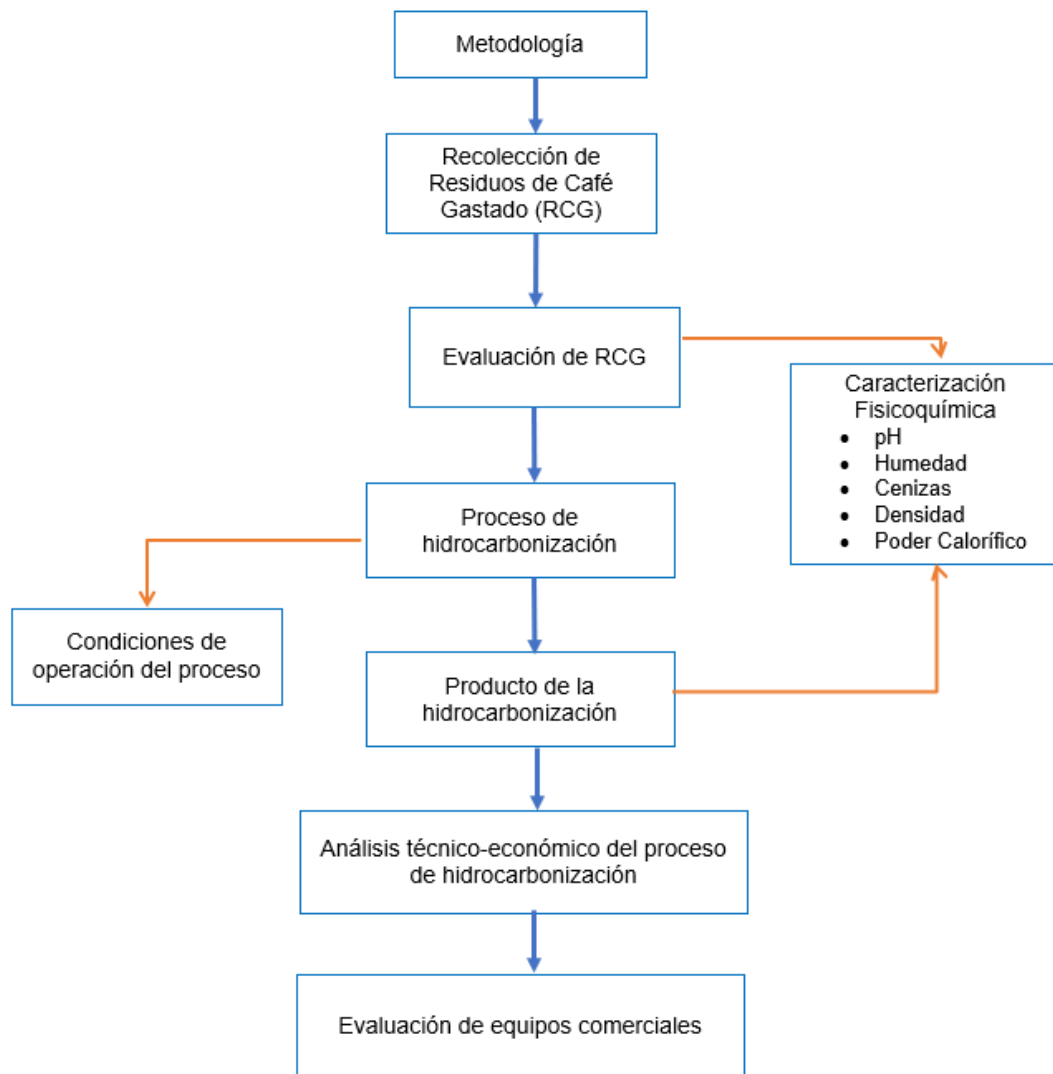


Figura 2. 1 Metodología para la investigación

2.1 Recolección de Residuos Sólidos de Café

Los Residuos Sólidos de Café (RSC) se obtuvieron de cafeterías locales del municipio de Orizaba, Ver., México, que comercializan café en grano, molido y bebidas preparadas, el cual es cosechado y procesado en los estados de Veracruz, Chiapas, Oaxaca, etc. Estos RSC se generan mediante la percolación y son colectados y almacenados por los establecimientos en un periodo no mayor a 5 días aproximadamente; dependiendo de la venta del producto. Sin embargo, se colectaron aproximadamente de 0.5 kg a 1 kg por día por cafetería. Posteriormente las muestras se almacenaron herméticamente con bolsas de polipropileno bajo refrigeración a una temperatura de 4 °C en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental I para su caracterización y procesamiento de CHT, para esta investigación se realizó el estudio a tres distintas marcas de café.

2.1.1 Acondicionamiento del residuo de café

Para los residuos de café, obtenidos por la percolación de café, se requirió un análisis visual para descartar algún agente externo (como lo son plásticos, metales, partículas de otro residuo que no sea café, etc.) que pudiese contribuir a un mal desarrollo del proceso, pues al estar contaminada los resultados no serían confiables, y con ello un obstáculo para el análisis, otro factor es el tamaño de las partículas de los residuos, esta última característica es favorable gracias a que en las cafeterías, es triturado de forma muy fina el grano de café, por lo que si se llegase a encontrar un grano de café completo se tritura con un mortero o bien extraerlo.

2.1.2 Caracterización fisicoquímica del residuo de café

Una vez ya recolectada, estos residuos deberán ser acondicionados y valorados para su caracterización mediante análisis fisicoquímicos mencionados en la Tabla 2.1.

Tabla 2. 1 Determinaciones Analíticas de los residuos de café y de hidrocarbonización.

Parámetro	Método	Equipo
pH	Potenciómetro 4500-H+B Estándar Methods	Potenciómetro OAKTON
Humedad	Método gravimétrico 2540 BSM Estándar Methods	Estufa Riossa
Cenizas	Método gravimétrico 2540 ESM	Mufla 1300 Furnace
Carbono	Determinación de Carbono Orgánico Total	Analizador TruSpec CN Purga y trampa
Poder Calorífico	Método de prueba estándar para el poder calorífico bruto del carbón y el coque ASTM D5865	Calorímetro de Isoperibol LECO Modelo AC600

2.2 Hidrocarbonización

El proceso de hidrocarbonización se obtuvo mediante un reactor hidrotérmico de alta presión (RHAP), el cual tiene una capacidad máxima de 1 kg, por lo que se trabajó en un 70 % de la capacidad, 350 g de residuo de café y 350 ml de agua, una vez cargado el lote, se sella, y se arranca el reactor definiendo las condiciones de operación mediante el controlador descritas en el siguiente, al finalizar, se apagó el reactor y se esperó a que se enfriara un aproximado de hora y media el reactor, de tal modo que sea segura la extracción de biogás y bioaceite para su almacenamiento, después de esto, se extrae el biocarbón generado, se pesa siendo este el resultado de peso húmedo, siguiendo con el procedimiento, el hidrocarbón es ingresado a secado en una estufa de marca Riossa, durante 2 horas a una temperatura de 110 °C. El biocarbón seco se tritura mediante un mortero para disminuir el tamaño de la partícula y es almacenado para realizar los análisis correspondientes.

2.2.1 Condiciones de operación del proceso

De acuerdo con la bibliografía consultada, se establecieron dos factores de interés en el proceso de hidrocarbonización de los residuos de percolación de café, estas variables son la temperatura (T) y el tiempo de residencia (TR), ya que ambas están ampliamente relacionadas con el poder calorífico del hidrocarbón. Las condiciones de operación en cada lote de operación se presentan en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2 Parámetros de operación en CHT.

Parámetro	Relación 1:1 350 g RCG + 350 ml Agua Fresca								
	175			185			200		
Temperatura (°C)									
Tiempo (min)	60	120	180	60	120	180	60	120	180

2.3 Análisis técnico-económico del proceso de hidrocarbonización

Para este análisis se requieren los siguientes puntos:

- Describir el problema de forma esencial para la comprensión de lo que se está trabajando.
- Se delimitan los objetivos de este análisis
- Se obtiene información relevante de los problemas que estén involucrados.
- Se definen soluciones viables del problema para cumplir con los objetivos del análisis (es aquí donde se desarrollan los primeros temas de costos como el costo de operación anual y el costo inicial de los equipos.
- Se realiza un estado de resultados, los cuales cuentan con una proyección de ingresos y egresos, además de ventas en un periodo de tiempo determinado, también se necesita la información de costo de mano de obra indirecta e indirecta, costos variables y fijos.
- Para seleccionar el criterio de valor se recomienda el uso del VAN/VPN

2.3.1 Análisis de poder calorífico

La calorimetría es la medición de los cambios de calor y un calorímetro o bomba calorimétrica (Figura 2.2) es un recipiente aislado que mide la variación de temperatura del agua, debido al flujo de calor que se libera durante la combustión de una muestra. Por lo tanto, mediante una bomba calorimétrica es posible determinar experimentalmente el flujo de calor asociado a una reacción química (ΔH_r).



Figura 2. 2 Bomba calorimétrica y sus componentes (Murillo-Hernández, 2019)

La bomba calorimétrica cuenta con un recipiente cerrado, diseñado para resistir altas presiones, donde se coloca una muestra de masa conocida y se presuriza utilizando oxígeno. El primer recipiente se introduce dentro de un segundo recipiente que contiene un volumen de agua conocido, cuya función es aislar el primer recipiente. Posteriormente, mediante un sistema eléctrico se enciende la muestra y el calor de combustión liberado por la reacción se transfiere al primer recipiente y posteriormente al agua, provocando un aumento en su temperatura. Para calcular correctamente el calor de combustión de una reacción, es necesario conocer la capacidad calorífica del calorímetro (Cp_{cal}), cuyo valor representa la cantidad de calor absorbido por el primer recipiente. Para medir la Cp_{cal} , se debe quemar una masa conocida de una muestra estándar, cuyo poder calorífico (PC, kJ/mol) se conozca, y el valor de la Cp_{cal} se calcula utilizando la Ecuación 2.1.

$$Cp_{cal} = \frac{PC_{estandar} * m_{estandar}}{PM_{estandar} * \Delta T_{agua}} [=] \frac{kJ}{^{\circ}C} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Una vez que se conoce el valor de la Cp_{cal} , se calcula la ΔH_r de cualquier sustancia, midiendo la masa de la muestra, la variación de la temperatura del agua y empleando la Ecuación 2.2, considerando que el calorímetro es un sistema aislado.

$$\Delta H_r = \frac{-Cp_{cal} * PM_{muestra} * \Delta T_{agua}}{m_{muestra}} [=] \frac{kJ}{mol} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Materiales y equipo

Las sustancias que se utilizarán durante el desarrollo de la práctica se especifican a continuación:

- 2 L de agua destilada.
- 6 cm de alambre de Nicromo.
- 10 cm de hilo de algodón.
- 1 g de ácido benzoico (para calibración).
- Muestra de combustible.

El equipo complementario que se utilizará se muestra a continuación:

- Pinzas de corte.
- Pinzas de punta de laboratorio.
- Tijeras.
- Probeta de 1 L.
- Pipeta o jeringa.
- Guantes de latex.
- Espátula de laboratorio.
- Tanque de oxígeno grado extra seco uso industrial con regulador de presión.
- Balanza analítica
- Vernier Digital

Los elementos de la bomba calorimétrica, marca P.A. Hilton LTD, modelo C200 se mencionan a continuación y se presentan en la Figura 2.3.

1. Vaso de la bomba (1)
2. Vaso del calorímetro (2)
3. Recipiente con chaqueta aislante (3)
4. Agitador mecánico (4)
5. Consola de control (5)
6. Válvula de venteo de la bomba (6)
7. Varilla sujetadora de la bomba (8)
8. Crisol para muestra (11)
9. Llave para válvula tipo Schrader (12)
10. Manómetro (13)
11. Prensa para pellets (14)
12. Disco de ruptura de seguridad (15)
13. Sensor de temperatura (16)



Figura 2. 3 Elementos de la bomba calorimétrica, marca P.A. Hilton LTD, modelo C200 (Murillo-Hernández, 2019)

Determinación de la cantidad de muestra

Debido a las condiciones de seguridad de la bomba calorimétrica, es necesario calcular la cantidad de muestra en gramos que se debe pesar para realizar una corrida experimental.

- En la Tabla 2.3 se encuentra tabulado el Poder Calorífico (PC, kJ/kg) de diversos combustibles (Murillo-Hernández, 2019). No se debe utilizar ningún combustible que no se encuentre en la tabla, ya que el equipo está diseñado para operar utilizando estos combustibles.
- Para cuantificar los gramos de combustible a utilizar durante el experimento, se debe:
- Buscar en la Tabla 2.3 el valor del Poder Calorífico (kJ/kg) del combustible a utilizar.

Aplicar la Ecuación 2.3, considerando como límite 28,000 Joules, que equivale aproximadamente al 95 % del valor máximo del equipo.

$$m_{T,Combustible} = \frac{28,000}{(PC, kJ/kg)} [=] \quad \text{Ec. 2.3}$$

Tabla 2. 3 Valores de poder calorífico aceptables (Murillo-Hernández, 2019)

Combustible	Valor calorífico bruto kJ/kg
Acetona	29,000
Alcohol 96 %	30,000
Antracita	32,500 - 34,000
Carbón bituminoso	17,000 – 23,250
Carbono	34,000
Carbón vegetal	29,600
Carbón	15,000 – 27,000
Coque	28,000 – 31,000
Diesel	44,800
Etanol	29,700
Éter	43,000
Gasolina	47,300

Combustible	Valor calorífico bruto kJ/kg
Glicerina	19,000
Lignito	16,300
Aceite vegetal	39,000 – 48,000
Turba	13,800 – 20,500
Petróleo	48,000
Petróleo Crudo	43,000
Propano	50,350
Semi antracita	26,700 – 32,500
Azufre	9,200
Alquitrán	36,000
Trementina	44,000
Madera (seca)	14,400 – 17,400

Obtención de datos experimentales

Durante el desarrollo experimental se requiere obtener los siguientes datos:

Masa teórica de la muestra

$$m_{T,Combustible} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Masa real de la muestra, líquido

$$m_{R,Combustible} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Masa del alambre de Nicromo

$$m_{alambre} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Masa de hilo de algodón

$$m_{Hilo} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Temperatura inicial del agua

$$T_{inicial} = \underline{\hspace{2cm}}$$

Dentro del equipo se adquiere el valor de variación de la temperatura respecto al tiempo, como se observa en la Tabla 2.4

Tabla 2. 4 Variación de temperatura respecto al tiempo

t (min)	ΔT (°C)
1	-
2	-
3	-
...60	-

El PC del hilo de algodón y del alambre de Nicromo son:

$$PC_{Hilo\ de\ algod\ on} = 17,496.60\ J/g$$

$$PC_{Alambre} = 1,402.20\ J/g$$

Mientras que para la capacidad calorífica de la bomba calorimétrica (CP_{cal}) se determinó experimentalmente utilizando como sustancia de referencia el ácido benzoico, cuyos valores son:

$$PC_{Acido\ Benzoico} = 26,450.00\ J/g$$

$$Cp_{calorimetro} = 25,973.27\ J/^{\circ}C$$

Para calcular el poder calorífico (PC) se utilizó la siguiente formula:

$$PC_{Muestra} = \frac{Cp_{calorimetro} * \Delta T_{maximo} - PC_{hilo} * m_{hilo} - PC_{alambre} * m_{alambre}}{m_{rCombustible}}$$

Tabla 2. 5 Valores obtenidos en el Calorímetro AC600

Tiempo de operación RHAP	Peso (g)	Poder calorífico (MJ/kg)
Residuo de percolación de café		
fresco	-	-

2.3.3 Análisis Técnico - Económico de acuerdo con la estimación de costos y flujos de efectivo

La revista Chemical Engineering publica periódicamente índices reconocidos como el índice de costos de plantas de ingeniería química (CEPCI) con el propósito de ayudar a estimar el costo de capital (Marzbali *et al.*, 2021). Los datos son divulgados en la literatura o calculados utilizando información de años anteriores. Otro elemento fundamental para llevar a cabo la estimación de costos de los equipos de CHT es la capacidad de los equipos, lo que implica que el costo del instrumento debe ser ajustado en base a la capacidad de volumen de los RCG con agua para manejarlo; para calcular el reactor escalado se utilizó la Ecuación 2.4 y empleando la Ecuación 2.5 se calcularon los costos de los equipos originales de uso directo.

$$CER = COR * \left(\frac{\frac{FM_E}{LHSV_E}}{\frac{FM_0}{LHSV_0}} \right)^n \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde:

CER = Costo Escalado del Reactor

COR = Costo Original del Reactor

FM_E = Flujo Masico Escalado

FM_0 = Flujo Masico Original

$LHSV_E$ = Velocidad espacial horaria del líquido escalado

$LHSV_0$ = Velocidad espacial horaria del líquido original

n = Exponente de escala

$$CE = CO * \left(\frac{FM_E}{FM_0} \right)^n \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde:

CE = Costo Escalado

CO = Costo Original

FM_E = Flujo Masico Escalado

FM_0 = Flujo Masico Original

n = Exponente de escala

Por su parte, n generalmente es un valor que se encuentra en el rango de 0.6 - 0.8. Utilizando los valores derivados de las dos ecuaciones antecedentes, se encuentra la posibilidad de calcular el costo de adquisición de los dispositivos.

De tal forma, se consideró el posible eslabón de manufactura para estimar los desembolsos de los dispositivos implantados en el proceso de CHT; para tal fin, se aplicó la Ecuación 2.6. Es necesario realizar esta adaptación debido a que cualquier instrumento o dispositivo que deba ser instalado conllevará una serie de costos vinculados a su instalación (Marzbali *et al.*, 2021;). El costo no instalado generalmente es multiplicado por un factor de instalación para determinar el costo de instalación:

$$CI = CE * FI \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde:

CI = Costo instalado

CE = Costo escalado del equipo

FI = Factor de instalación

Cabe destacar que el factor de instalación depende del tipo de equipo que se esté instalando, a pesar de ello, este valor se encuentra dentro del rango entre 1.5 – 2.5 (Jones *et al.*, 2014).

El Costo Total Instalado (CTI) es la suma de los costos instalados para todos los equipos, cada planta que se instala es distinta una de otra, sin embargo, cada planta debe de pagar algunos costos directos e indirectos al establecerse, el costo del resto de la planta (conocido por otros nombres como los componentes adicionales). El costo total directo (CTD) se puede calcular con la Ecuación 2.7:

$$CTD = CTI + CC + DS + TA \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

CTD = Costo total directo

CTI = Costo total instalado

CC = Costo de construcción

DS = Desarrollo del sitio

TA = Tuberías adicionales

Estas fórmulas incluyen CTI, costos de construcción que representa el 1 % del CTI, desarrollo del sitio 9 % del CTI, así como tuberías adicionales 4.5 % del CTI. El costo indirecto total se puede calcular a partir de la Ecuación 2.8.

$$CIT = GP + TC + GC + CP \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde:

CIT = Costos indirectos

GP = Gastos prorrateados
 TC = Tarifas de construcción
 GC = Gastos de campo
 CP = Contingencia de proyecto

Se realizó un estado de resultados con una proyección de ingresos y ventas de 10 años, donde se tomó en cuenta los costos de operación.

Es por ello que, para calcular el flujo de efectivo, los costos de operación y los costos de mantenimiento se fijaron en un 2 % de la inversión inicial (Forgács., *et al* 2012). De tal forma se tomó una proyección de 10 años sin variación de ventas. El flujo neto de efectivo se calculó con los datos de ingresos y egresos planteados utilizando la Ecuación 2.9:

$$FNE = FE - FS \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde:

FNE = Flujo neto de entrada

FE = Flujos de entrada

FS = Flujos de salida

Por último, para el criterio de valor se tomó en consideración el VPN, para obtener ese valor, es necesario obtener el valor de la tasa mínima aceptable de retorno (TMAR), el cual se calculó a partir de la Ecuación 2.10.

$$TMAR = i + f + i * f \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde:

i = Inflación

f = riesgo o premio al riesgo

Finalmente, para obtener el VPN de los distintos escenarios se utilizó la Ecuación 2.11

$$VPN = -P + \left(\frac{FNE_1}{(1+i)^1} \right) + \left(\frac{FNE_2}{(1+i)^2} \right) + \left(\frac{FNE_3}{(1+i)^3} \right) + \left(\frac{FNE_4}{(1+i)^4} \right) + \left(\frac{FNE_5}{(1+i)^5} \right) \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde:

VPN = Flujo neto de entrada

FNE = Flujo neto de entrada

i = TMAR aplicada

2.4 Evaluación de equipos comerciales

Se analizaron distintos tipos de reactores que cuentan con características favorables para el proceso de hidrocarbonización térmica, equipos que trabajan presiones y temperaturas altas, ya que ayudan a la formación de carbón dentro del residuo. Estos equipos son desglosados, evaluando su capacidad volumétrica y el costo neto del equipo, sin contar con gastos de envío. Para la evaluación de flujo energético se utilizó el medidor de consumo eléctrico (WATTIMETRO) modelo HER-432, Marca: Steren tal y como se muestra en la Figura 2.4.



Figura 2. 4 Wattimetro Steren 2019

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Recolección de Residuos de Café Gastado (RCG)

A continuación, se presenta el esquema del proceso de recolección de residuo, producción de hidrocarbón y producto terminado, mostrando la cadena de producción, el cual se puede observar en la Figura 3.1.

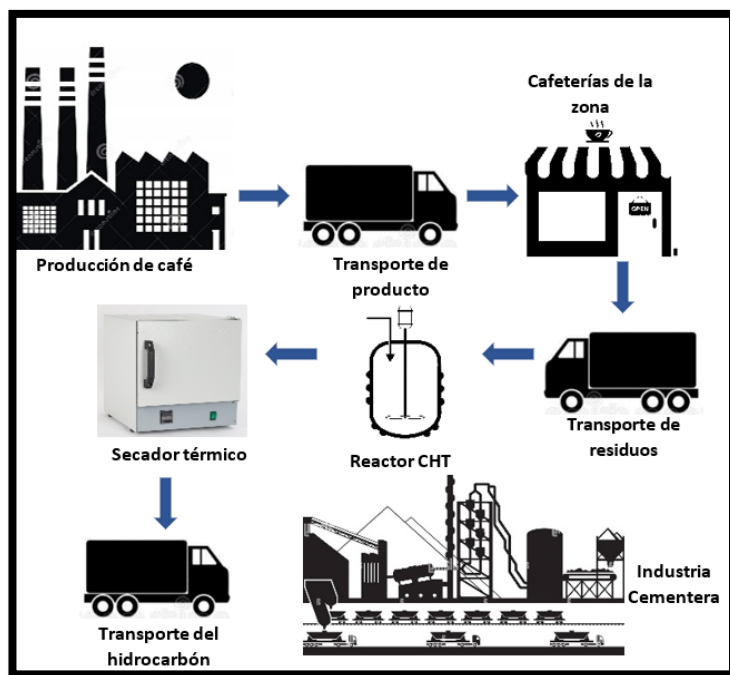


Figura 3. 1 Proceso de producción de hidrocarbón

El primer paso dentro del esquema anterior es la la cadena es la producción de café, donde el producto es transportado hasta las cafeterías mediante la logística de la comercializadora de café particular. Este producto en diferentes presentaciones llega a diferentes cafeterías en distintas zonas de comercialización tales como la que se muestra en la Figura 3.2; donde, es utilizado para el consumo de bebidas, postres, y venta a granel. Los establecimientos que proveen este tipo de servicios y productos van generando poco a poco los residuos de café gastado (RCG).

A partir de los datos analizados de los distintos puntos de venta de estos productos se construye la Tabla 3.1, lo cual permite observar un panorama más amplio basados en las cantidades y tipos de café que se utilizan en la ciudad, y son marcas representativas comercializadas generalmente a nivel nacional en México, y en otros países como principal marca exportadora de café; Cafiver.

Tabla 3. 1 Inventario de cafeterías en la zona centro de Orizaba, Veracruz. México (2023).

Cafetería	Marca de café	Tipo de café	Kilogramos generados al día (kg)	Frecuencia de desechos	Uso del residuo	Disposición del residuo
Cafecitla	Cafiver blend plus grano	Café arábico (tostado y molido)	0.5	Al día.	Abono	Almacenaje
La abuelita	Propia Zongolica artesanal	Café arábico Variedad catuai	1	Al día	Desecha	Ninguno
Santa Anita	Café orgánico Ameyal	Café arábico	1	Al día	Abono	Ninguno
Café Tatiaxca	Tatiaxca	Café arábico (grano)	1	Al día	Desecha	Ninguno
La Jarochita	Café magal Zongolica	Café orgánico arábigo	1	Al día	Desecha	Almacenaje
Lunas de café	Café artesanal	Café arábico	2	Al día	Abono	Almacenaje
Dauzon	Café colombiano	Café arábico	0.5	Al día	Desecha	Ninguno
La antigua coffe house	La antigua	Café arábico costa rica	1	Al día	Desecha	Ninguno
INSITU Cafés especiales	Regional Zongolica	Café arábico Typica y Borbón	1	Al día	Desecha	Ninguno
Aroma Gourmet cafetería	Artesanal	Café arábico (Tueste	0.5	Al día	Desecha	Ninguno

repostería fina.		medio)				
María Bonita	Cafiver	Café arábico	0.5	Al día	Desecha	Almacenaje
Café Zepahua Gourmet	Café Zepahua	Café arábico borbón (Tostado tipo francés)	0.750	Al día	Desecha	Ninguno
Expresso café	Café Xalapa artesanal	Café arábico (Tostado)	0.5	Al día	Abono	Almacenaje
Café el quinto aroma	Quinto Aroma House blend	Café arábico (Tostado)	2	Al día	Desecha	Almacenaje
Cafiver	Cafiver	Café arábico	2	Al día	Desecha	Almacenaje
RCG Total	-	-	15	Al día	-	-



Figura 3. 2 Cafetería donde se recolectaron uno de los residuos de café para la producción de hidrocarbón

Después de coleccionar los Residuos de café utilizados por las cafeterías y además considerando las características propias del café que se esté utilizando, se tomaron en cuenta tres distintos tipos de café, el primero de ellos es el Café Toka Premium, siguiendo con el Café Cafiver House Blend, y por último el Café Lunas de Café Artesanal, debido a la repetitividad con la que se presentan estas marcas en todo el municipio de Orizaba y la Región de las Altas Montañas, Ambas marcas se muestran en la Figura 3.3.



Figura 3. 3 Café utilizado con sus respectivas características dentro del empaque.

Estos residuos fueron transportados al laboratorio de ambiental I dentro del Instituto Tecnológico de Orizaba donde se pesó y etiqueto para su almacenamiento. A estos RCG se le realizaron las caracterizaciones fisicoquímicas descritas en el apartado anterior de los residuos del café, antes de ser procesado. De igual forma para el producto generado de la hidrocarbonización.

3.2 Caracterización del Residuo de Café Gastado

Los residuos orgánicos se sometieron a los procesos de caracterización fisicoquímica descrita en la metodología del apartado 2.1.2, los resultados se pueden observar en la Tabla 3.2.

Tabla 3. 2 Caracterización fisicoquímica del residuo de café en promedio

Café Toka Premium (A)				
pH	%Humedad	%Cenizas	%ST	%SV
5.78 ± 0.64	71.495 ± 0.52	1.1535 ± 0.31	28.505 ± 0.52	98.605 ± 0.31
Café Cafiver House Blend (B)				
pH	%Humedad	%Cenizas	%ST	%SV
5.98 ± 0.11	66.155 ± 0.63	1.455 ± 0.38	33.845 ± 0.63	98.545 ± 0.38
Café Lunas de Café Artesanal (C)				
pH	%Humedad	%Cenizas	%ST	%SV
5.78 ± 0.64	61.95 ± 0.37	1.70 ± 0.58	38.05 ± 0.37	98.30 ± 0.58

El RCG presenta un pH de 5.78 a 6.23 el cual, comparándolo con una investigación reciente (Soobhany, 2018) es un valor menor al registrado, quien presentó un 7.1 utilizando residuos sólidos urbanos. La humedad que se obtuvo en promedio es de 66.54 %, valor similar al 67.7 % de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (Hernández-Nazario *et al.*, 2018), sin embargo los valores de humedad presente es menor a la requerida, por lo que se recomendó agregar agua para aumentar hasta un 80% de humedad para la mejora del proceso (Wilk *et al.*, 2021) y valores de porcentaje de cenizas similares, por otra parte, los ST fueron de 28.50 % a 38.05 % presentando un valor menor que el 59.23 % aplicando este proceso en residuos sólidos orgánicos urbanos (Tapia-Gómez, 2017). Además, este residuo contiene fracciones orgánicas e inorgánicas por lo que se realizó dicho análisis para tomar como punto de comparación

con los resultados del producto de la carbonización hidrotérmica. Cabe destacar que el contenido del residuo es únicamente el café utilizado en la percolación de un solo tipo de café en específico.

3.3 Carbonización hidrotérmica del café gastado

Para el proceso de carbonización hidrotérmica se utilizó el reactor hidrotérmico de alta presión presentado en la Figura 3.4; el cual se acondicionó y configuró para el uso de tres diferentes temperaturas (175 °C, 185 °C y 200 °C) a tres tiempos distintos (60 min., 120 min. y 180 min.) tal y como se describieron en el apartado 2.2.1.



Figura 3. 4 Reactor Hidrotérmico

Los resultados obtenidos se pueden analizar de acuerdo con las gráficas y tablas que se presentan a continuación:

Producción de Biogás

La obtención de biogás generada se observa en la Figura 3.5, donde se presentan

cada uno de los volúmenes obtenidos correspondiente para cada corrida experimental.

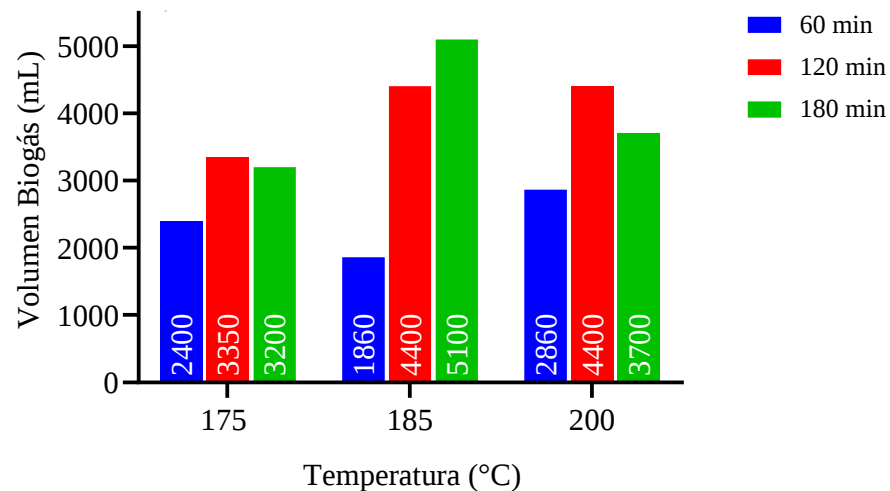


Figura 3. 5 Grafica de producción de biogás (Café Toka Premium)

En el proceso de la hidrocarbonización se generan dos subproductos importantes, biogás y bioaceite, de acuerdo con el análisis del primer tipo de café Toka Premium (A), se puede observar en la Figura 3.5 que el valor máximo fue de 5100 mL de biogás, mientras que el valor mínimo fue de 1860 mL, cabe destacar que si se requiere obtener la mayor cantidad de biogás generado, será utilizando este producto en el reactor hidrotérmico de alta presión, a una temperatura de 185 °C y con un tiempo de residencia hidráulico de 60 minutos.

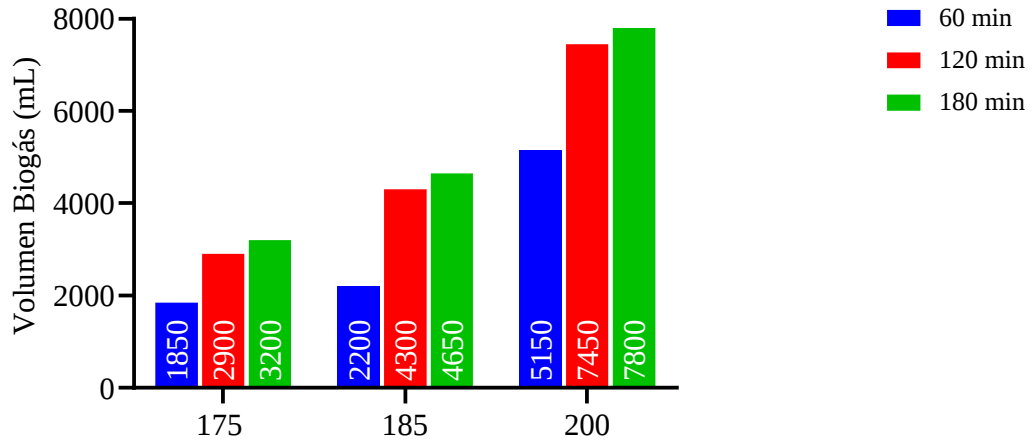


Figura 3. 6 Grafica de producción de biogás Cafiver House Blend)

En el segundo café utilizado, Café Cafiver House Blend (B) se puede observar como va aumentando de forma proporcional en la producción de biogás de acuerdo con la temperatura y el tiempo de residencia hidráulico, teniendo como valor mínimo de 1850 mL, mientras que el valor máximo presente fue de 7800 mL, cabe destacar que si se toma en cuenta el valor máximo y el valor que más se aproxima es de 7450 mL, tal como lo muestra en la Figura 3.6, con 60 minutos menos, y teniendo un flujo de energía menor, por lo que se considera una mejor opción (200°C y 120 minutos).

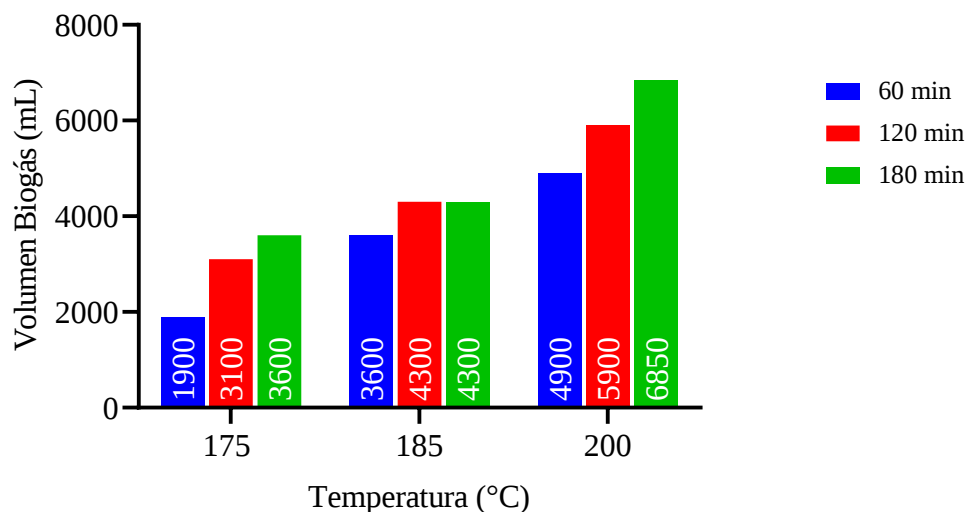


Figura 3. 7 Grafica de producción de biogás (Café Lunas de Café Artesanal)

De acuerdo con la gráfica de generación de biogás en la Figura 3.7, los valores máximos generados fueron a partir de la temperatura y tiempo máximo (200 °C y 180 minutos) pues se generaron 6850 mL de biogás, que, comparándolo con el valor más cercano, es mucho mayor que el resultado de 5900 mL, ya que es casi un litro de biogás más, por lo tanto, a partir de estas graficas se recomienda el uso del reactor con RCG (B) pues fue el residuo con mejores resultados.

Análisis de Bioaceite

Después de la extracción de biogás y se obtiene el bioaceite, este líquido se midió y almacenó para investigaciones posteriores, los resultados se pueden observar en la Tabla 3.3 donde se muestra la cantidad generada en cada una de las configuraciones utilizadas.

Tabla 3. 3 Volúmenes de bioaceite generado

Café Toka Premium (A)									
Tiempo (min)	60			120			180		
Temperatura (°C)	175	185	200	175	185	200	175	185	200
Volumen (mL)	365	150	370	380	300	430	335	375	420

Café Cafiver House Blend (B)									
Tiempo (min)	60			120			180		
Temperatura (°C)	175	185	200	175	185	200	175	185	200
Volumen (mL)	335	252	260	310	275	335	320	300	325

Café Lunas de Café Artesanal (C)									
Tiempo (min)	60			120			180		
Temperatura (°C)	175	185	200	175	185	200	175	185	200
Volumen (mL)	365	150	370	380	300	430	335	375	420

De acuerdo con los resultados, el tiempo y temperatura ideales para la generación de bioaceite es realizando el proceso a 200 °C y en un tiempo de 120 minutos para el tipo A y C, mientras que para el B es 175 °C a 60 minutos pues tiene menor tiempo de residencia hidráulica, cabe resaltar que la diferencia que existe entre el valor máximo y el más próximo es de 420 mL, a una temperatura igual a 200 °C y 180 minutos, por lo que es algo beneficioso el uso de un tiempo menor ya que no se consume más energía y utiliza menos tiempo.

Análisis de carbón hidrotérmico

Se realizó la caracterización fisicoquímica del carbón sintetizado, conforme a lo establecido en el apartado anterior, con lo que se construyeron la Tabla 3.4, descrita a continuación.

Tabla 3. 4 Análisis Fisicoquímico del carbón hidrotérmico (Café Toka Premium).

Tiempo (min)	60			120			180		
Temperatura (°C)	175	185	200	175	185	200	175	185	200
Peso húmedo (g)	252	220	224	239	231	253	258	286	238
Peso Seco (g)	81	82	62	71	63	72	80	60	58
pH	4.25	4	4.17	4	3.95	4.08	3.92	3.92	4.21
% Humedad	16.42	22.18	5.85	14.66	20.78	25.67	20.66	7.32	18.42
% Cenizas	22.90	30.46	33.77	26.42	34.80	38.47	31.16	37.63	39.44

En este caso se puede observar una tendencia ácida en el biocarbón generado con un promedio de 4.05 pH.

Tabla 3. 5 Análisis Fisicoquímico del carbón hidrotérmico (Café Cafiver House Blend).

Tiempo (min)	60			120			180		
Temperatura (°C)	175	185	200	175	185	200	175	185	200
Peso húmedo (g)	273	361	325	293	324	295	333	358	313
Peso Seco (g)	99	110	86	93	92	99	95	100	93
pH	3.81	3.75	3.86	3.75	3.77	3.86	3.62	3.83	4.03
% Humedad	27.12	17.27	5.82	7.12	5.70	5.52	7.94	5.44	4.46
% Cenizas	25.10	23.20	37.45	31.04	34.53	28.57	30.98	36.77	34.31

En la Tabla 3.5 cuenta con un promedio de 3.80 de pH que comparado con los resultados anteriores en el tipo A, aumento la acidez.

Tabla 3. 6 Análisis Fisicoquímico del carbón hidrotérmico (Café Lunas de Café Artesanal).

Tiempo (min)	60			120			180		
Temperatura (°C)	175	185	200	175	185	200	175	185	200
Peso húmedo (g)	304	282	298	300	282	282	322	292	258
Peso Seco (g)	96	84	92	90	87	86	92	81	96
pH	3.79	3.59	3.63	3.71	3.69	3.66	3.67	3.90	3.83
% Humedad	5.81	5.01	13.62	4.75	4.32	4.44	4.35	5.93	12.64
% Cenizas	22.44	23.37	32.60	28.17	32.68	36.86	29.46	35.73	30.51

En la Tabla 3.6 el promedio de pH es de 3.72, que se asemeja al resultado del tipo B, siendo muy semejantes los resultados obtenidos.

Monitoreo de bioconversión

Se realizó un monitoreo de la bioconversión en relación con los gramos de Peso Húmedo (g PH) y gramos de Peso Seco (g PS) para cada uno de los biocarbones generados.

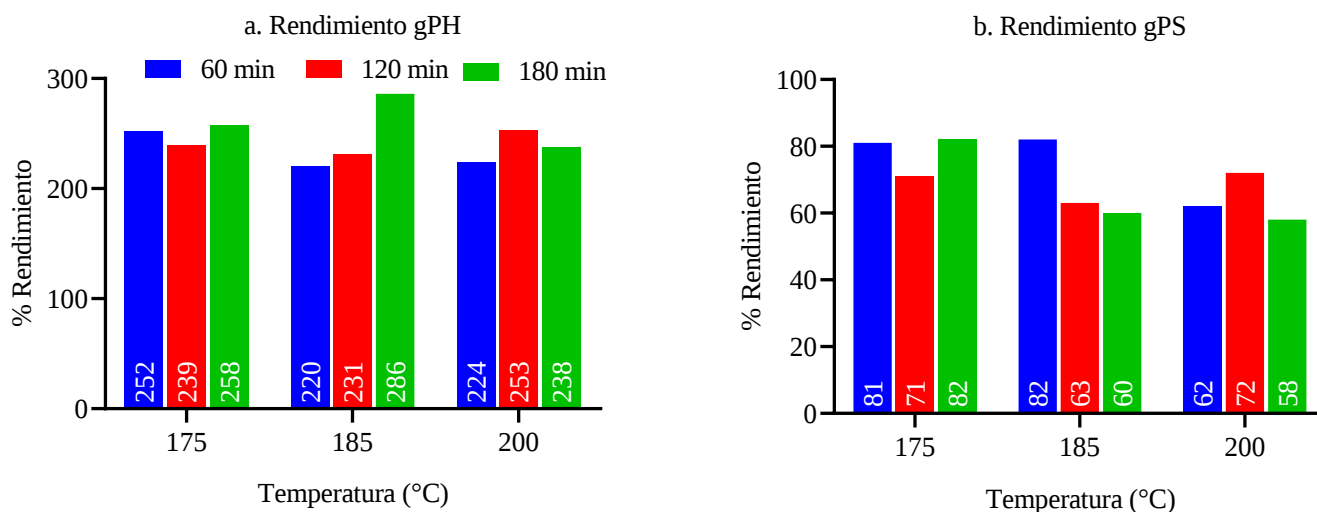


Figura 3. 8 Monitoreo de café "A" (a) g PH y (b) g PS

En la Figura 3.8 se puede observar que el valor máximo de la relación de PH es de 286 g, sin embargo, cuando se realiza el secado del biocarbón, tiene 60 g, que es menor, comparada con los otros resultados, de tal modo que se selecciona el biocarbón de la configuración de 175 °C - 180 min, pues se tiene un resultado de 82 g de biocarbón.

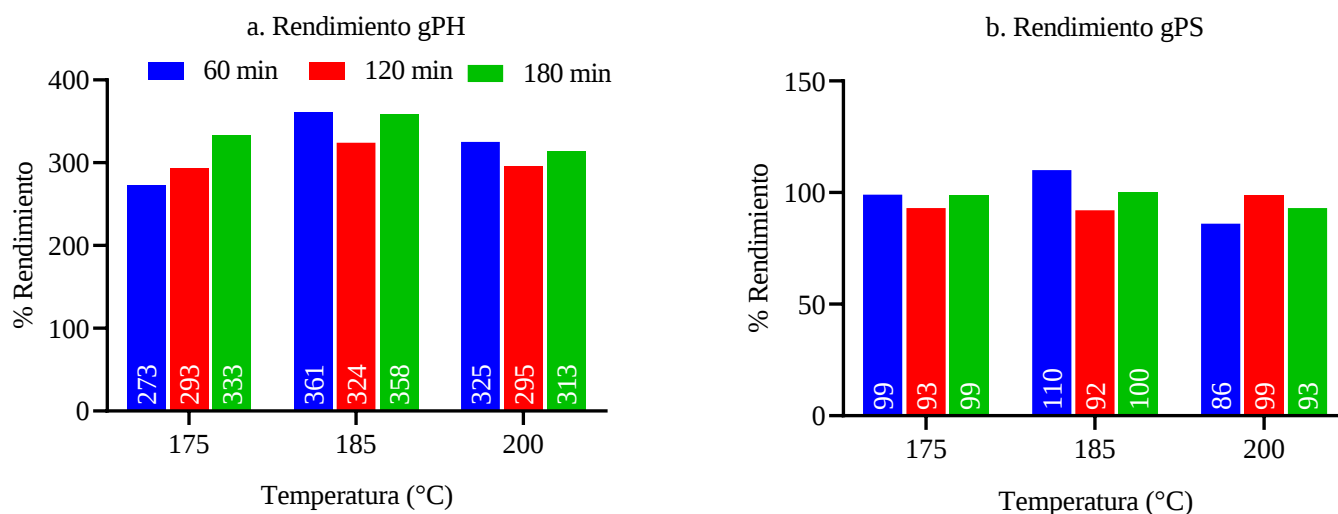


Figura 3. 9 Monitoreo de café "B" (a) g PH y (b) g PS

En la Figura 3.9 se observa que el mejor rendimiento a cuanto al PS es de la configuración de 185 °C y 60 min, que da un resultado de 110 g de biocarbón, que es bastante similar al de 180 min, sin embargo, el flujo de energía eléctrica es mucho menor, es por ello por lo que se consideraría una mejor elección.

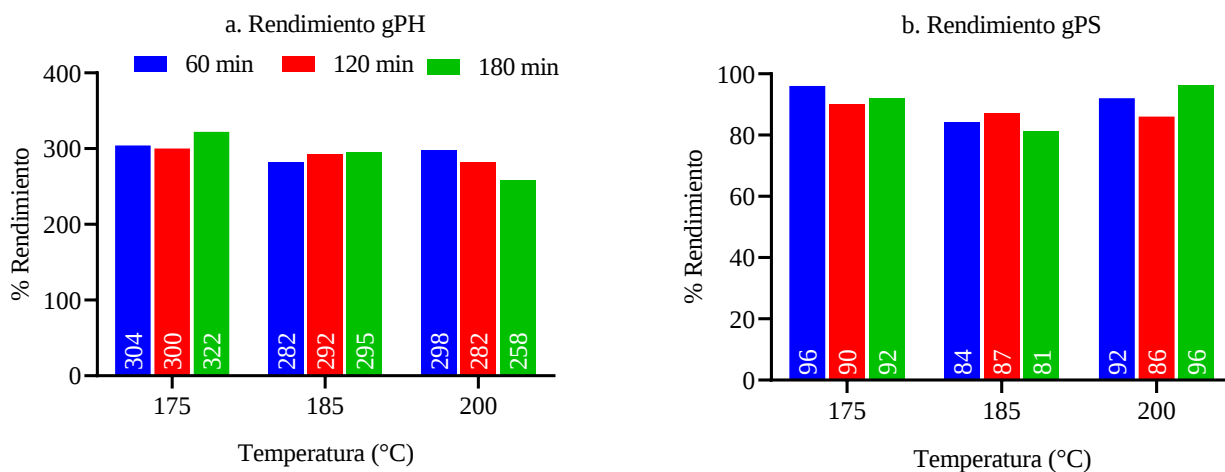


Figura 3. 10 Monitoreo de café "C" (a) g PH y (b) g PS

En la Figura 3.10 se observa la cantidad de producto generado, dando como mejores resultados las condiciones de 175 °C a 60 min y 200 °C a 180 min, con un resultado de 96 g PS. Conforme a lo anterior, se puede establecer que la mayor producción de hidrocarbón se presenta en el lote de café “B” correspondiente al ensayo experimental de 60 minutos a una temperatura de 185 °C, alcanzando una producción de 361 g PH, que coincide con la mayor cantidad de 110 g PS, que si se compara con los datos obtenidos en los experimentos realizados, se cuenta como un buen beneficio que es un tiempo y temperatura media, que si se cuenta con la cantidad de flujo de energía utilizado, es recomendable usar este tipo de configuración.

Monitoreo de sólidos totales y sólidos volátiles

De acuerdo con los resultados, la caracterización y monitoreo, se construyeron gráficas, que a continuación, se describen para los ensayos experimentales conforme a las temperaturas y tiempo de operación descritos anteriormente, tal y como se observa en las Figuras 3.11 a 3.13. Con lo anterior, de acuerdo con la Figura 3.11 se puede establecer que en el mejor de los casos el mayor porcentaje de ST contenidos en el hidrocarbón durante un periodo corto de operación (60 min) se presenta en el lote a 200 °C, alcanzando un 94.15 %, presentando la menor cantidad de SV, por lo que se puede inferir que la bioconversión de materia orgánica se lleva a cabo de manera más eficiente. Por otra parte, el desempeño a una temperatura de 175° C disminuye considerablemente y a la inversa con los SV; por lo que se infiere que a temperaturas menores la cantidad de componentes inorgánicos y por lo tanto residuos minerales sin procesar.

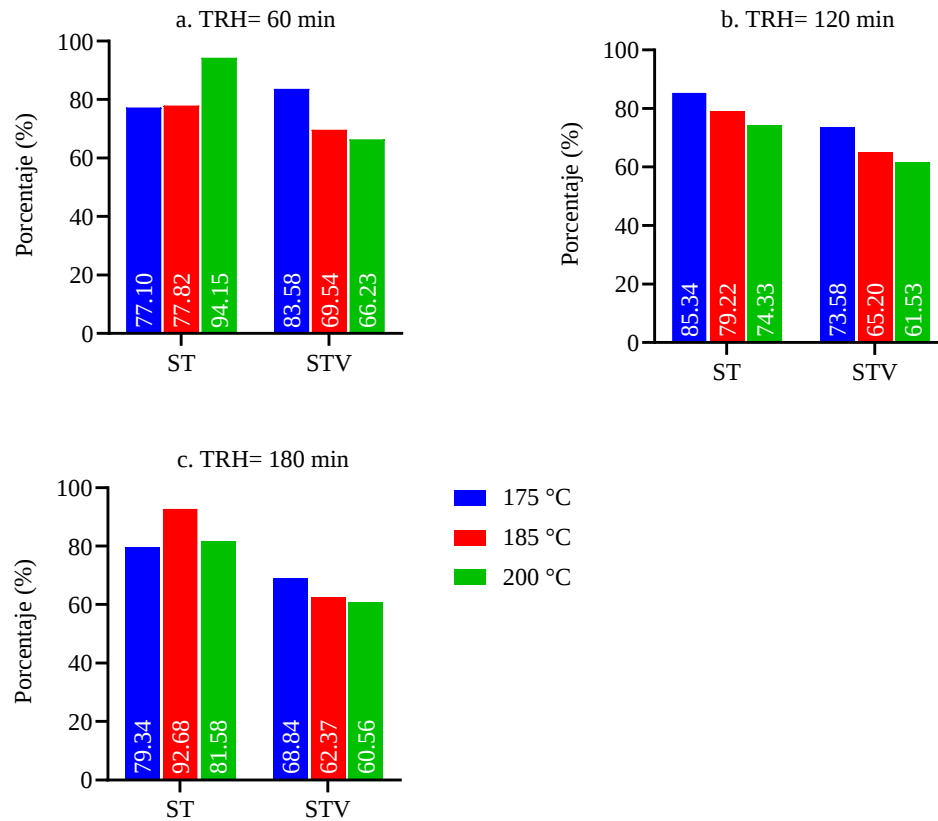


Figura 3. 11 Monitoreo de sólidos volátiles y sólidos totales “A” (Café Toka Premium)

Sin embargo, se presentan los valores alcanzados aumentando el tiempo de operación del reactor al doble, es decir, a 120 °C, donde se puede observar que, para alcanzar al menos un 85 % de ST es necesario emplear una temperatura de 175 °C presentando de igual forma un alto contenido de material inoxidable. Obteniendo en el peor de los casos una producción del 74.33 y 61.53 % de ST y SV respectivamente a una temperatura de 200 °C, reduciendo considerablemente el desempeño tomando en cuenta el tiempo operacional y el requerimiento energético.

A pesar de presentar resultados aceptables en la bioconversión y por ende en la producción del material orgánico en cuestión, aumentando el tiempo de operación a

180 min, se logran porcentajes de ST similares (79.34 y 81.58), como se presenta en la Figura 3.11. De igual forma, para este grafico se puede establecer que el lote con mayor producción de ST alcanza un valor del 92.68 % similar al lote de t= 60 min con T= 200 °C; presentando una relación similar en la materia inorgánica presente en las muestras registrando 62.37 % SV. Por consiguiente, los mejores lotes conforme a los valores de sólidos presentados a partir de los residuos de la percolación del café hasta el momento, con relación a los valores de ST y por ende en la mayor bioconversión generada se obtienen en tiempos cortos de operación (60°C) y temperaturas altas (200°C) superando el 94 % de ST; además, en tiempos de operación largos (180 min) es necesario operar en temperatura media (185°C) para alcanzar hasta un 92 % de ST. Para ambos casos, se presentan valores de SV menores en un 30 % aproximadamente correspondiente a 66.23 y 62.37 respectivamente para ambos lotes de operación.

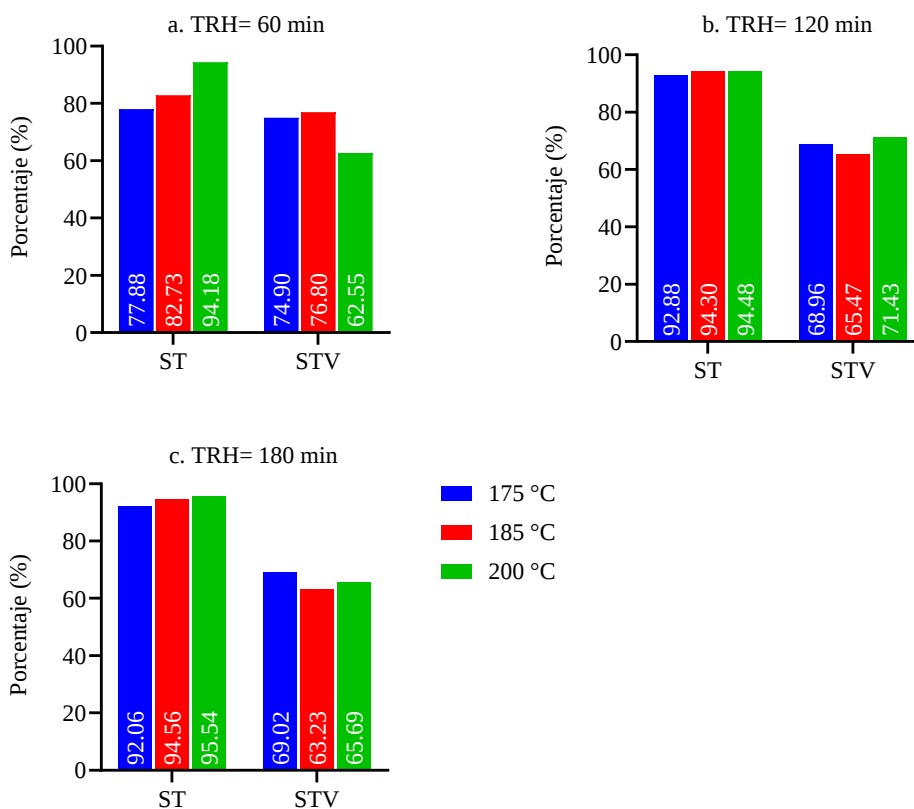


Figura 3. 12 Monitoreo de sólidos totales y sólidos volátiles “B” (Café Cafiver House Blend)

Los resultados en este análisis apuntan que el producto que tiene mejores resultados de mayor cantidad de ST en relación a los STV es el de la configuración de 200 °C a 60 minutos, presentando un porcentaje de 94.18 % de ST y 62.55 % de STV, sin embargo se puede observar una gran homogeneidad en los resultados de 120 min y 180 min de los ST, lo cual indica que existe una gran cantidad de humedad presente en el producto, sin embargo las cantidades de STV en los demás resultados, muestran que existe materia inorgánica, que de acuerdo con la bibliografía, es maligno para la producción de energía calorífica y se vea reflejado en el poder calorífico del material.

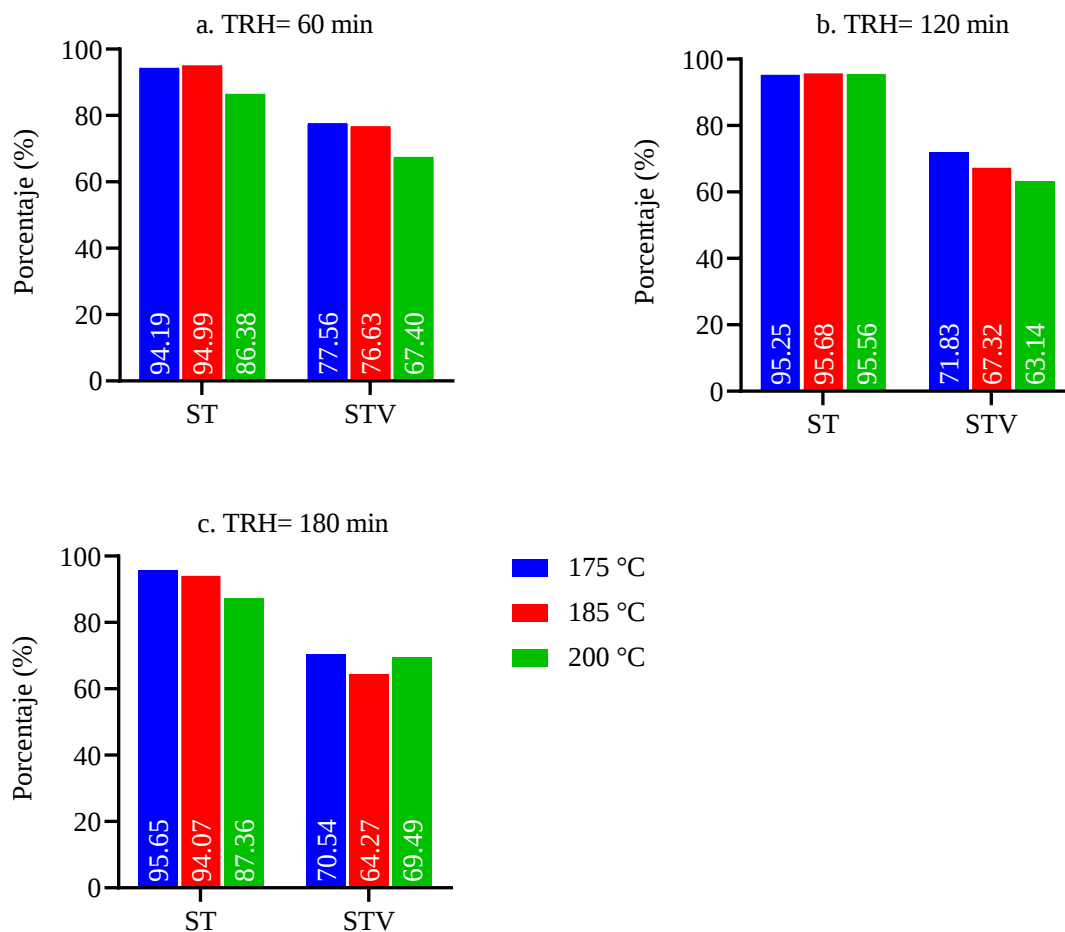


Figura 3. 13 Monitoreo Sólidos Totales y Sólidos Volátiles “C” (Café Lunas de Café Artesanal)

Como se puede observar en la Figura 3.13, presenta una homogeneidad en los resultados, para los valores de sólidos totales, con un valor máximo de 95.25 % (175

°C y 120 minutos), sin embargo, el valor mínimo de Sólidos Volátiles es de 63.14 % (200 °C y 120 minutos), lo cual se recomendaría el uso del tiempo medio de residencia hidráulica, ya que representa un menor gasto de energía para mantener la temperatura. No obstante, conforme a la mayor cantidad de ST, y por lo tanto un aumento probable en el poder calorífico debido a la conversión de materia orgánica compleja y la disminución en el contenido de minerales, se puede considerar la obtención de hasta 62 g de hidrocarbón con tiempos cortos (60 min) y temperaturas altas (200 °C) como se observa en la Figura 3.12.

3.4 Proceso de carbonización hidrotérmica

Se realizó el balance energético de los experimentos que se realizaron en el laboratorio y se muestran en la Tabla 3.7, con el fin de cuantificar la cantidad de energía que requiere el proceso de hidrocarbonización, desde el tiempo de acondicionamiento, hasta el tiempo de residencia hidráulico de cada uno de los procesos.

3.5 Balance Energético del Reactor Hidrotérmico de Alta Presión

En esta sección se muestran en la Tabla 3.8 los poderes caloríficos que cada biocarbón generó.

Tabla 3. 7 Flujo energético del proceso de hidrocarbonización

Marca de Café	Temperatura (C°)	Tiempo de Residencia Hidráulica (h)	Tiempo de acondicionamiento (h)	Tiempo Total (h)	Energía Consumida (kWh)
A	175	1	4.17	5.17	1.645
A	175	2	4.17	6.17	1.978
A	175	3	4.17	7.17	2.232
A	185	1	4.75	5.75	1.809
A	185	2	4.85	6.85	2.116
A	185	3	4.75	7.75	2.311
A	200	1	6	7	2.400
A	200	2	6	8	2.566
A	200	3	6	9	3.041
B	175	1	4.07	5.07	1.510
B	175	2	4.17	6.17	1.978
B	175	3	4.25	7.25	2.245
B	185	1	5.12	6.12	1.957
B	185	2	4.88	6.88	2.172
B	185	3	5.08	8.08	2.648
B	200	1	6	7	2.400
B	200	2	6.17	8.17	2.741
B	200	3	6.05	9.05	3.060
C	175	1	4.50	5.5	1.738
C	175	2	4.55	6.55	2.056
C	175	3	4.58	7.58	2.890
C	185	1	5.25	6.25	1.996
C	185	2	5.33	7.33	2.255
C	185	3	5.47	8.47	2.849
C	200	1	6.17	7.17	2.235
C	200	2	6.50	8.5	2.86
C	200	3	6.50	9.5	3.319

Tabla 3. 8 Balance energético a partir de la relación de energía y consumo

Marca de Café	Temperatura (C°)	TRH (h)	Energía Consumida (MJ)	Poder calorífico (MJ/kg)	Energía aportada por el hidrocarbón (MJ)	Relación de energía (hidrocarbón/consumo)
A	175	1	3.600	23.74	1.92294	0.534
A	175	2	7.200	26.38	2.16316	0.300
A	175	3	10.800	29.37	1.82094	0.169
A	185	1	3.600	37.45	2.65895	0.739
A	185	2	7.200	24.96	1.57248	0.218
A	185	3	10.800	34.38	2.47536	0.229
A	200	1	3.600	31.15	2.492	0.692
A	200	2	7.200	11.61	0.6966	0.097
A	200	3	10.800	28.82	1.67156	0.155
B	175	1	3.600	19.01	1.88199	0.523
B	175	2	7.200	16.95	1.8645	0.259
B	175	3	10.800	26.94	2.31684	0.215
B	185	1	3.600	17.9	1.6647	0.462
B	185	2	7.200	24.32	2.23744	0.311
B	185	3	10.800	19.68	1.94832	0.180
B	200	1	3.600	22.83	2.16885	0.602
B	200	2	7.200	22.1	2.21	0.307
B	200	3	10.800	23.69	2.20317	0.204
C	175	1	3.600	18.66	1.79136	0.498
C	175	2	7.200	23.81	2.00004	0.278
C	175	3	10.800	33.9	3.1188	0.289
C	185	1	3.600	26.09	2.3481	0.652
C	185	2	7.200	23.84	2.07408	0.288
C	185	3	10.800	30.4	2.6144	0.242
C	200	1	3.600	40.52	3.72784	1.036
C	200	2	7.200	38.19	3.09339	0.430
C	200	3	10.800	20.1	1.9296	0.179

3.6 Análisis de los costos energéticos del proceso de hidrocarbonización térmica

De acuerdo con los datos obtenidos en la sección 3.8 el valor que contiene el mejor rendimiento en relación de energía y consumo de energía, teniendo en cuenta también los mejores resultados del análisis de ST y STV, el cual fue de 200 °C y 1 h. En la Tabla 3.9 se muestran los datos utilizados para la estimación de costos en este análisis.

Tabla 3. 9 Costos energéticos de la carbonización hidrotérmica

Concepto	Unidad	Valor
Energía del proceso de CHT (Valor Promedio)	2.345	kWh
Costo de kWh Industrial	1.85	kWh
Costo de operación de CHT	4.338	MXN

El estimado de costo de producción de biocarbón a partir del proceso de hidrocarbonización, de acuerdo con los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio se muestran en la Tabla 3.10, estimando una generación de al menos 1 Tonelada de RCG al día y el costo de combustibles y sus poderes caloríficos, cuyos datos se encuentran en la Tabla 3.11.

Tabla 3. 10 Relación de energía y costos a partir del valor promedio

RCG + Agua	Biocarbón kgPS*	Energía requerida (kWh)	Costos (MXN)
0.7 kg	0.08	2.345	4.338
1 kg	0.1143	3.350	6.1971
10 kg	1.143	33.50	61.971
100 kg	11.43	335.0	619.71
1.000 kg	114.30	3350.0	6,197.10
365,000 kg	41,719.50	1,222,750.00	2,261,941.50

*En promedio

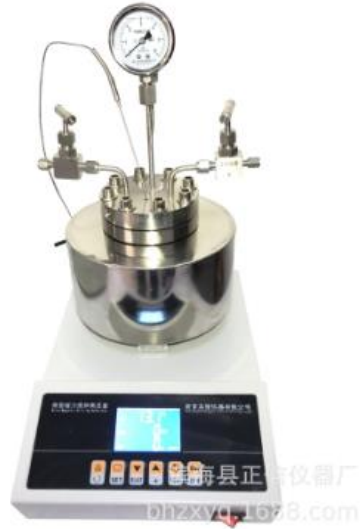
Tabla 3. 11 Costos de combustibles y poder calorífico aportado

Materia de combustible	Unidad	Poder Calorífico (MJ/kg)	Fuente de información	Costo del combustible
Combustóleo	Barril	0.03	CRE	1,600.00
Gas LP	Litro	0.04	CRE	13.31
Gas natural	MXN/GJ	0.05	CRE	110.00
Carbón minero	Tonelada	26.75	ANCE	3,460.00
Carbón hidrotérmico	Tonelada	31.50	Análisis de laboratorio	6,197.10

3.7 Equipos de hidrocarbonización térmica

Se realizó la búsqueda de equipos comerciales donde se permita el proceso de la hidrocarbonización térmica, cada uno de estos equipos son descritos en la Tabla 3.12.

Tabla 3. 12 Lista de equipos comerciales y características operativas

Nombre	Descripción	Costo Original (MXN)	Ilustración
Reactor de alta presión y temperatura	Marca: Instrumentos Zhengxin Modelo: PSK Tipo: Acero inoxidable Volumen: 2 L Poder de calefacción: 0 – 1800 kW Especificación: Agitación Magnética Año: 2023	1.010.70	
Reactor hidrotérmico de alta presión	Marca: Toption Intrumenst Presión de trabajo: 40 bar Temperatura de trabajo: 250 °C	115.000.00	

	Material: Acero Inoxidable Volumen: 1 L Año: 2021		
Reactor de Síntesis Hidrotermal	Marca: Shanghai Linbel Instrument Co., Ltd. (Linbel) Modelo: SSR-20L Presión: Positivo Calefacción: Circulación de aceite Volumen: 20 L Voltaje: 220 V/60 Hz, 38 V/60 Hz Tamaño del diámetro: 300 - 500 mm Año: 2023	45,311.00	
Reactor Hidrotermal de alta presión y mezclador de síntesis química	Marca: Zhengzhou Keda (ZZKD) Tipo: Hervidor de reacción Material: Acero Inoxidable Volumen: 60 L Presión: Negativo Año: 2023 Fuente de Alimentación: 220 V/50 Hz, 110 V/60 Hz, 240 V/60 Hz Año: 2023	53,307.00	

Reactor de alta presión para preparar materiales avanzados por método hidrotermal

Marca: Zhengzhou CY Scientific Instrument Co. Ltd (CYKY)

Modelo: CY-1100X-RC

Temperatura de Trabajo: 0 -1100 °C

Presión: Positiva – Negativa

36 MPa - 500°C

4 MPa - 1100°C

Volumen: 65 mL

Año: 2023

83,515.00



Reactor de caldera de calentamiento

Marca: Botai

Modelo: BT-BXGFYF001

Tipo: Acero Inoxidable

Volumen: 100 L

Poder de calefacción: 6 – 90 kW

Especificación:

Caldera

Año: 2023

35,374.46



**Reactor
calentamiento
eléctrico**

de

Marca: Tecnología
Rongxin
Modelo: RX-200kg
Tipo: Alta presión
Volumen: 200 L
**Poder de
calefacción:** 12 kW

17,181.88



**Reactor
calentamiento
eléctrico**

de

Marca: Hengxin
Modelo: 125
Tipo: Acero
Inoxidable
Volumen: 500 L
**Poder de
calefacción:** 24 kW
Año: 2023

4,800.82



Reactor de Mezcla Hidrotermal	Marca: Guangzhou Maike Machinery Co. Ltd (Maike) Modelo: MK-FYF10 Volumen: 1000 L Calefacción: Calentamiento de agua caliente Tamaño del cilindro: 1100 mm Año: 2023	88,846.55
--------------------------------------	---	------------------



Reactor de síntesis hidrotermal	Marca: Dingsheng Modelo: DS-076 Tipo: Alta presión Volumen: 2000 L Poder de calefacción: 15 kW Fuerza del motor: 15 kW Tamaño del diámetro: 1600 mm Año: 2023	45,481.45
--	--	------------------



3.7.1 Análisis técnico-económico del proceso de hidrocarbonización a diferentes escalas

En el desarrollo de este apartado se hizo a partir de la recolección de información que permitió estimar cada uno de los valores económicos como lo son los ingresos, egresos, costos, gastos, inversión, impuestos, etc., además se utilizó como método de estimación a partir de costos de escalado (Marzbali *et al.*, 2021) quien utiliza como parámetro el uso de flujo masico especifico que se muestra en la Tabla 3.13 y las condiciones de operación que requieren.

Tabla 3. 13 Calculo detallado para costos de equipo (Marzbali *et al.*, 2021).

Equipo	Flujo Masico Original (kg/h)	Costo Original (USD)	Exponente de escala	Factor de Instalación
Reactor	139,013	18,743,378.00	0.77	2.1
Intercambiador de calor	139,013	4,670,523.00	0.6	1.4
Filtro prensa	553,773	3,945,523.00	0.68	1.9
Secador	2522	905,000.00	0.8	1.6

Análisis técnico-económico del proceso a distintas escalas

Se realizaron tres distintos escenarios, en los cuales se especifican los equipos utilizados, sus flujos masicos, y sus costos de adquisición mostrados en la Tabla 3.14.

Tabla 3. 14 Flujos masicos y costos de adquisición

Equipo	Laboratorio (1)		Planta Piloto (2)		Industrial (3)	
	Flujo Masico (kg/h)	(MXN)	Flujo Masico (kg/h)	(MXN)	Flujo Masico (kg/h)	(MXN)
Reactor CHT	0.7	115,000.00	140.0	290,545.59	1,500.0	773,184.65
Intercambiador de calor	-	-	140.0	45,901.20	1500.0	116,249.40
Filtro prensa	-	-	140.0	20,400.00	1500.0	50,805.48
Secador/Estufa	0.456	20,901.20	64.4	41,996.00	690.0	128,772.65

Las escalas se seleccionaron a partir de las cantidades manejadas en el laboratorio, un escenario de prueba en planta piloto y finalmente, una planta capaz de procesar estos residuos de café gastado de la zona Rio Blanco-Orizaba-Fortín.

Cada equipo requiere costos de instalación (CI), los cuales son detallados en la Tabla 3.15 para los escenarios ya descritos y los equipos utilizados durante el proceso.

Tabla 3. 15 Costos de equipos instalados

Equipo	1 (MXN)	2 (MXN)	3 (MXN)
Reactor CHT	241,500.00	610,145.74	1,623,687.77
Intercambiador de calor	-	64,261.68	162,749.16
Filtro prensa	-	38,760.00	96,530.41
Secador	33,596.80	67,193.60	206,036.24

Siguiendo con el procedimiento, es la obtención del costo total directo, el cual se puede observar en la Tabla 3.16, como la suma del costo total instalado, además de las construcciones necesarias para la puesta en marcha del reactor, desarrollo del sitio, y tubería adicional.

Tabla 3. 16 Costo total directo

Componentes adicionales	1 (MXN)	2 (MXN)	3 (MXN)
Costo total instalado (CTI)	275,096.80	780,361.02	2,089,003.58
Construcción	2,720.968	7,803.6102	20,890.04
Desarrollo de sitio	24,488.712	70,232.4918	188,010.32
Tubería adicional	12,244.356	35,116.2459	94,005.16
Costo total directo (CTD)	311,550.836	893,513.368	2,391,909.10

En este apartado, se calculó el costo indirecto de cada escenario, los cuales están representados de acuerdo con porcentajes específicos (Marzbali *et al.*, 2021). Gastos de índole prorrateados (10 % CTD), de oficina y construcción (20 % CTD), de campo (10 % CTD), contingencia del proyecto (10 % CTD), puesta en marcha y permisos (5 % CTD).

Tabla 3. 17 Costos indirectos

Nombre de Costos	1 (MXN)	2 (MXN)	3 (MXN)
Gastos prorrateados	31,155.08	89,351.34	239,190.91
Gastos de oficina y construcción	54,419.36	156,072.20	417,800.72
Gastos de campo	31,155.08	89,351.34	239,190.91
Contingencia del proyecto	27,209.68	78,036.10	208,900.36
Puesta en marcha y permisos	15,577.54	44,675.67	119,595.45
Costo indirecto total	159,516.75	457,486.65	1,224,678.35

De acuerdo con el procedimiento, se requiere el cálculo de inversión de capital fijo (ICF), el cual es la suma de los costos directos e indirectos totales del proceso, en este caso, la hidrocarbonización. El costo de capital de trabajo se asume que es del 5 % del ICF, y por último la suma del ICF y capital de trabajo da como resultado la inversión de capital total (ICT), como se describe en la Tabla 3.18.

Tabla 3. 18 Inversión de capital total para el proceso de CHT

Concepto	1 (MXN)	2 (MXN)	3 (MXN)
Inversión de capital fijo	471,067.59	1,341,000.02	3,616,587.45
Capital de trabajo	23,553.38	67,550.00	180,829.37
Inversión de capital total	494,620.96	1,418,550.02	3,797,416.82

Flujos de efectivo

De acuerdo con la información estudiada, los costos de operación y mantenimiento se fijaron en 2 % del fondo de inversión inicial (Forgács *et al.*, 2012) que abarcan los gastos básicos de agua, electricidad, etc., así como la compra de insumos que requiere el proceso de hidrocarbonización. En la Tabla 3.19 se muestran las suposiciones que se realizaron para estimar un aproximado de flujos de efectivo (Cash Flow), específicamente para la escala industrial, debido a las cantidades de flujo masico que se manejan, es el más propicio a realizar un análisis con enfoque de valor presente neto.

Tabla 3. 19 Suposiciones para estimar flujos de efectivo

Concepto	Valor	Unidad
Días laborales	313	Días
RCG por día	1,500	kg
RCG anual	469,500	kg
TMAR	8.58	%
Precio de hidrocarbón	8.0	MXN
Ganancias anuales por venta	1,727,760.00	MXN
Inversión Inicial	3,797,416.82	MXN
Costos operativos y de mantenimiento anual	75,948.3364	MXN/año

En la Tabla 3.20 se muestran los flujos de efectivo a escala industrial, que empiezan a partir del periodo 0, ya que cuenta con la inversión inicial requerida para la puesta en marcha de la escala industrial, sin tomar en cuenta los gastos de recolección.

Tabla 3. 20 Flujos netos de efectivo escala industrial

Periodo	Ingresos Netos	Egresos Netos	Flujo Neto de Efectivo
0		150,620,000.00	
1	1,727,760	75,948.3364	1,651,811.664
2	2,246,088	100,251.804	2,145,836.196
3	2,919,914.4	132,332.381	2,787,582.019
4	3,795,888.72	174,678.743	3,621,209.977
5	4,934,655.34	230,575.941	4,704,079.395
6	6,415,051.94	304,360.242	6,110,691.694
7	8,339,567.52	401,755.52	7,937,811.998
8	10,841,437.8	530,317.286	10,311,120.49
9	14,093,869.1	700,018.818	13,393,850.29
10	18,322,029.8	924,024.84	17,398,005

Para calcular el VPN se requiere la estimación de la TMAR, es por ello por lo que, para realizar el procedimiento descrito en la metodología, se requiere tomar en cuenta dos factores importantes, el índice de riesgo de inversión Tabla 3.21 y la inflación del país con un 4.79 % (INEGI, 2023).

Tabla 3. 21 EMBLI Global Diversified Subindices (Chase, 2023)

Fecha	Honduras	México	Guatemala
11-ago-23	4.64	3.65	1.99
14-ago-23	3.76	3.67	2.00
16-ago-23	3.77	3.73	2.08
17-ago-23	3.75	3.81	2.08
18-ago-23	3.76	3.83	2.09
21-ago-23	3.70	3.82	2.07
23-ago-23	3.70	3.74	2.11
24-ago-23	3.63	3.72	2.09
25-ago-23	3.61	3.71	2.09
28-ago-23	3.64	3.69	2.10
29-ago-23	3.73	3.64	2.13
30-ago-23	3.73	3.62	2.12

Finalmente, se estimó el valor de la tasa mínima aceptable de retorno de 8.58 %, de acuerdo con el riesgo de 3.62 %, obteniendo un resultado mostrado en la Tabla 3.22.

Tabla 3. 22 VPN Escala industrial

Escala Industrial (3)	
VPN	\$38,789,443.79 MXN

El valor positivo indica que el proceso de hidrocarbonización es rentable, dado que los escenarios de laboratorio y planta piloto, los flujos masicos son mínimos, por lo que se recomendó el uso de la escala industrial para obtener el mejor resultado.

CONCLUSIONES

Con lo anterior, es viable el aprovechamiento de los RCG aplicando nuevas tecnologías como el proceso de carbonización hidrotermal a través de un reactor de alta presión, mediante el cual, se pueden obtener rendimientos considerables de bioconversión a diferencia de procesos convencionales como el de la pirolisis el cual genera altos costos de operación y mantenimiento, desarrollando no solo un producto final, sino que también se cuenta con dos subproductos importantes, la generación de biogás y bioaceite, que abre nuevas líneas de investigación para este tipo de proceso. De igual forma, esta alternativa puede convertirse en una solución viable en países en vías de desarrollo debido a la alta demanda de productos de origen agroalimentario y, por ende, la generación excesiva de residuos sólidos y su disposición sin tratamientos de ningún tipo. Esto gracias a que, el procesamiento de los RCG puede resultar en un beneficio económico como mejorador de suelos y el poder calorífico adquirido una vez procesado. Cabe destacar que el poder calorífico que genera el biocarbón, es muchísimo mayor, sin embargo, las cantidades másicas de RCG con las que se deben de trabajar deben de ser a mayor escala, que de acuerdo con el análisis económico-energético que provee este producto, el costo asciende a casi más del doble que cuesta un carbón mineral, de modo que se recomendaría el uso de este residuo combinándolo con productos citrícolas o residuos orgánicos. Otro caso importante para considerar son los equipos comerciales con los que se cuentan, pues existen diferentes tipos y complementos que podrían mejorar el proceso de la

hidrocarbonización como el agitador interno que varios equipos de los que se investigó cuentan, estos equipos comerciales cuentan con volúmenes específicos, que solo se pueden trabajar al 70 % de su capacidad como medida de seguridad, ya que los reactores manejan a temperaturas y presiones altas. Los equipos mostrados en los resultados son los costos originales, sin embargo, no cuentan con el costo de envío, los únicos reactores que se conocen el costo de envío son los utilizados en los escenarios establecidos como escala laboratorio, planta piloto, e industrial.

En el análisis técnico-económico que se manejó en este proyecto de investigación, abarca primeramente en el uso de energía que requiere el proceso en distintas configuraciones del reactor, usando los tres distintos tipos de café utilizados, a tres tiempos de residencia hidráulico, y tres diferentes temperaturas, por lo que los cambios energéticos son mínimos pues el controlador de energía no mostro alguna variabilidad considerable. Con el análisis de poder calorífico del hidrocarbón generado, se pueden observar la cantidad de energía calorífica liberada en su incineración.

Los costos utilizados en el artículo (Marzbali *et al.*, 2021) utiliza una enorme cantidad de flujo masico, específicamente de 139,013. kg/h, mientras que para el primer caso de estudio económico el proceso de laboratorio fue de 0.7 kg/h, la ventaja de esta escala es que los equipos con los que se trabajaron son únicamente dos, el reactor hidrotérmico de alta presión, y la estufa que fungía como secador del hidrocarbón. Sin embargo, desarrollan costos altos, con un total de \$ 135,901.20 MXN, obteniendo por si solo un CTD de \$ 311.550.836 MXN, y un CIT de \$159,516.75 MXN, por lo que se requiere un mínimo de inversión de capital total de \$ 494,620.96 MXN. Para el segundo análisis se estimó que para el desarrollo en planta piloto se requiere cuatro equipos, un reactor CHT con capacidad de 200 kg/h, un intercambiador de calor, un filtro prensa y un secador, concluyendo en un CTD de \$ 893,513.368 MXN, un CIT de \$ 457,486.62 MXN, y una inversión de capital total de \$ 1,418,550.02 MXN. Para el último caso que se llevó a cabo, el reactor tuvo una capacidad de 2,000 L, el cual tiene como característica principal un flujo masico de 1,500 kg/h, por lo que se puede realizar un análisis más complejo como lo es el VPN, el cual muestra la rentabilidad del proyecto, este caso industrial, cuenta con un valor de CTD de \$ 2,391,909.10 MXN, CIT de

\$1,224,678.35 MXN, y una inversión de capital de al menos \$ 3,797,416.82 MXN, para la estimación de flujos de efectivo se tomó en cuenta la inversión de capital, utilizando los porcentajes establecidos dentro del apartado, cuenta una producción de hidrocarbón de 469,500.00 kg anuales, con un margen de ganancia de \$ 1,727,760.00 MXN, por lo que, calculando los ingresos y egresos netos, tomando en cuenta la inflación, y el parámetro de tasa mínima de retorno, obtener un VPN de \$ 38,789,443.79 MXN, mostrando que este proyecto es rentable a estas características.

RECOMENDACIONES

- Utilizar distintos equipos comerciales para obtener un panorama más amplio si el equipo influye o no en el proceso de la hidrocarbonización térmica
- Recaudar más información para desarrollar una simulación del proceso, el cual, a partir de un diseño de experimentos, permita establecer la mejor configuración del reactor y el tipo de producto que mejores resultados obtenga con el menor flujo de energía eléctrica necesaria.
- Combinar distintos tipos de biomásas con el RCG ya que como se pudo observar, el poder calorífico con el que se cuenta es muchísimo mayor comparado con otros residuos, el único inconveniente son las cantidades másicas necesarias para llevar a cabo este proceso.
- Utilizar agua tratada para el proceso de la hidrocarbonización, ya que se utilizó con agua fresca del laboratorio, este tipo de líquido sería ideal para el proceso ya que al no es para el consumo humano, las empresas privadas podrían ocupar este proceso como fuente de ingresos o bien utilizar este residuo para generar su propia energía.
- Se recomienda una planificación de una cadena de suministros que combine RCG y residuos sólidos urbanos o cítricos, para que las características del hidrocarbón sean aumentadas como lo es el poder calorífico.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdelhadi, S. O., Dosoretz, C. G., Rytwo, G., Gerchman, Y., and Azaizeh, H. (2017). Production of biochar from olive mill solid waste for heavy metal removal. *Bioresource Technology*, 244, 759-767.
- Afolabi, O.O., Sohail, M. and Cheng, Y.L., (2020). Optimización y caracterización de la producción de hidrochar a partir de posos de café por carbonización hidrotermal. *Energía renovable*, 147, 1380-1391.
- Aguilera-Díaz, A. (2017). El costo-beneficio como herramienta de decisión en la inversión en actividades científicas. *Cofin Habana*, 11(2), 322-343.
- Akaki, P. P., and Huacuja, F. E. (2006). Cadenas globales y café en México. *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada*, 38(1), 69-86.
- Álvarez-Murillo, A. (2017). Usos alternativos para la biomasa. Búsqueda de valor añadido para subproductos, la hidrocarbonización. *Catálogo de investigación joven en Extremadura. Volumen I*.
- Alves, R. C., Rodrigues, F., Nunes, M. A., Vinha, A. F., and Oliveira, M. B. P. (2017). State of the art in coffee processing by-products. In *Handbook of coffee processing by-products* (pp. 1-26). Academic Press.
- Amat, O. (2008). Análisis integral de empresas. *Peninsula y baleares: Bresca*.
- Aragón-Briceño, C., Ross, A., and Camargo-Valero, M. (2020). Mass and energy integration study of hydrothermal carbonization with anaerobic digestion of sewage sludge. *Renewable Energy*, 167: 473-483.
- Arredondo-Ferrer, E., Buitrago-Sierra, R., and López, D. (2022). Materiales carbonosos jerarquizados derivados de la borra de café para su aplicación en supercondensadores. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 46(178), 233-247.
- Axelsson, L., Franzén, M., Ostwald, M., Berndes, G., Lakshmi, G., Ravindranath, N. H. (2012). Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 6 (3): 246-256. <https://doi.org/10.1002/bbb>
- Bargmann, I., Rillig, M. C., Kruse, A., Greef, J. M., and Kücke, M. (2014). Effects of hydrochar application on the dynamics of soluble nitrogen in soils and on plant availability. *Journal of plant nutrition and soil science*, 177(1), 48-58.

Bartoloni, S., Ietto, B., and Pascucci, F. (2022). Do connoisseur consumers care about sustainability? Exploring coffee consumption practices through netnography. *British Food Journal*.

Berge, N. D., Li, L., Flora, J., and Ro, K. S. (2015). Assessing the environmental impact of energy production from hydrochar generated via hydrothermal carbonization of food wastes. *Waste Management*, 43: 203-217.

Berge, N. D., Ro, K. S., Mao, J., Flora, J. R., and Chappell, M. A. (2011). Hydrothermal Carbonization of Municipal Waste Streams. *Environmental Science and Technology*, 45(13): 5696-5703.

Blinová, L., Sirotiak, M., Bartošová, A., and Soldán, M. (2017). Utilization of waste from coffee production. *Vedecké Práce Materiálovotechnologickej Fakulty Slovenskej Technickej Univerzity v Bratislave so Sídлом v Trnave*, 25(40), 91.

Burguete, A. C. L. (2016). *Análisis financiero*. Editorial digital UNID.

Cabrera, G., and Elizabeth, P. (2019). *Obtención de carbón mediante carbonización hidrotermal utilizando bagazo de caña* (Bachelor's thesis, Quito: UCE).

Campos, R. C., Pinto, V. R. A., Melo, L. F., da Rocha, S. J. S. S., and Coimbra, J. S. (2021). New sustainable perspectives for “Coffee Wastewater” and other by-products: A critical review. *Future Foods*, 4, 100058.

Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H. A., Dave Oomah, B. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science and Technology*. 45 (1): 24-36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.012>

Canet-Brenes, G., Soto Viquez, C., Ocampo Thomason, P., Rivera Ramírez, J., Navarro Hurtado, A., Guatemala Morales, G., and Villanueva Rodríguez, S. (2016). La situación y tendencias de la producción de café en América Latina y el Caribe. *La situación y tendencias de la producción de café en América Latina y El Caribe*.

Carroll, W. F. (2022). Coffee. In *Superfoods* (pp. 51-64). Springer, Cham.

Cayo-Reinoso, E. L. (2018). Obtención de un biocombustible sólido por torrefacción húmeda a partir de la cáscara de la mazorca de cacao para la generación de energía. Tesis. Escuela Politécnica Nacional, Quito.

Cervera-Mata, A. G. (2022). Utilización de residuos de la Industria Cafetera como enmiendas orgánicas de suelos para la mejora de alimentos de origen vegetal.

Cervone, H. (2010). Using cost benefit analysis to justify digital library projects. *OCLC Systems & Services: International digital library perspectives* (26), 2, pp. 76-79.

Chase, J.P. (2023) Riesgo País EMBI. Invenomica

Chen, C., Sun, X., Jiang, X., Niu, D., Yu, A., Liu, Z., & Li, J. (2009). A two-step hydrothermal synthesis approach to monodispersed colloidal carbon spheres. *Nanoscale research letters*, 4(9), 971-976.

Chen, H., Li, J., Li, T., Xu, G., Jin, X., Wang, M., and Liu, T. (2022). Performance assessment of a novel medical-waste-to-energy design based on plasma gasification and integrated with a municipal solid waste incineration plant. *Energy*, 245, 123156.

Chin, M. Y., Lee, C. T., and Woon, K. S. (2022). Policy-driven municipal solid waste management assessment using relative quadrant eco-efficiency: A case study in Malaysia. *Journal of Environmental Management*, 323, 116238.

Contador-Pérez, M. (2018). Análisis termoeconómico de la hidrocarbonización de materiales biomásicos (Bachelor's thesis).

da Silva, M. R., Bragagnolo, F. S., Carneiro, R. L., Pereira, I. D. O. C., Ribeiro, J. A.

A., Rodrigues, C. M., and Funari, C. S. (2022). Metabolite characterization of fifteen by-products of the coffee production chain: From farm to factory. *Food Chemistry*, 369, 130753.

del Castillo, A. F., Garibay, M. V., Senés-Guerrero, C., Orozco-Nunnally, D. A., de Anda, J., and Gradilla-Hernández, M. S. (2022). A review of the sustainability of anaerobic reactors combined with constructed wetlands for decentralized wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 133428.

Diwan, B., Mukhopadhyay, D., and Gupta, P. (2020). Recent trends in biorefinery-based valorisation of lignocellulosic biomass. In *Biovalorisation of Wastes to Renewable Chemicals and Biofuels* (pp. 219-242). Elsevier.

Donar, Y. O., Çağlar, E., and Sinağ, A. (2016). Preparation and characterization of agricultural waste biomass based hydrochars. *Fuel*, 183, 366-372.

dos Santos, P. M., Cirillo, M. Â., and Guimaraes, E. R. (2021). Specialty coffee in Brazil: transition among consumers' constructs using structural equation modeling. *British Food Journal*.

Du, Z., Hu, B., Shi, A., Ma, X., Cheng, Y., Chen, P., and Ruan, R. (2012). Cultivation of a microalga *Chlorella vulgaris* using recycled aqueous phase nutrients from hydrothermal carbonization process. *Bioresource technology*, 126, 354-357.

Echeverria, M. C., and Nuti, M. (2017). Valorisation of the residues of coffee agro-industry: perspectives and limitations. *The Open Waste Management Journal*, 10(1).

Erazo-Mendoza, C. E., y Pazmiño-Noroña, D. J. (2021). *Estudio comparativo del hidrochar obtenido de la carbonización hidrotermal del jugo de naranja en un ambiente con y sin oxígeno* (Bachelor's thesis, Quito: UCE).

Falco, C., Marco-Lozar, J., Salinas-Torres, D., Morallón, E., Cazorla-Amorós, D., Titirici, M. and Lozano-Castelló, D. (2013). Tailoring the porosity of chemically

Fang, J., Zhan, L., Ok, Y. and Gao, B. (2018). Minireview of potential applications of hydrochar derived from hydrothermal carbonization of biomass. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 57, pp.15-21.

Figuroa-Hernández, E., Pérez Soto, F., y Godínez Montoya, L. (2015). Importancia de la comercialización del café en México.

Forgács, G., Pourbafrani, M., Niklasson, C., Taherzadeh, M. J., & Hováth, I. S. (2012). Methane production from citrus wastes: process development and cost estimation. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 87(2), 250-255.

Francis D. (1976). Cost-Benefit Analysis and Public Library Budgets. *Library Review*, (25), 5/6 pp. 189-192.

Fujigaki, A. H. (2010). Consumo de café en México y el papel de las cafeterías. *Revista Vinculando*

Galanakis, C. M. (Ed.). (2017). *Handbook of coffee processing by-products: sustainable applications*. Academic Press.

Gallo, A. (2014). A refresher on net present value. *Harvard Business Review*, 19.

González, M. M. A. (2015). *Contabilidad y análisis de costos*. Grupo Editorial Patria.

Guimarães, E.R., Leme, P.H.M.V., De Rezende, D.C., Pereira, S.P. and Dos Santos, A.C. (2019), "The brand new Brazilian specialty coffee market", *Journal of Food Production. Marketing*, Vol. 25 No. 1, pp. 49-71

Haugbølle, K., and Raffnsøe, L. M. (2018). Rethinking life cycle cost drivers for sustainable office buildings in Denmark. *Facilities*.

Hernández-Soto, M. C., Hernández-Latorre, M., Oliver-Tomas, B., Ponce, E., and Renz, M. (2019). Transformation of organic household leftovers into a peat substitute. *JoVE (Journal of Visualized Experiments)*, (149), e59569.

Hernández-Nazario, L., Benítez-Fonseca, M., & Bermúdez-Torres, J. M. (2018). Caracterización físico-química de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos del vertedero controlado en el Centro Urbano Abel Santamaría de Santiago de Cuba. *Tecnología Química*, 38(2), 369-379.

Hu, B., Wang, K., Wu, L., Yu, S. H., Antonietti, M., and Titirici, M. M. (2010). Engineering carbon materials from the hydrothermal carbonization process of biomass. *Advanced materials*, 22(7), 813-828.

INEGI (2023). Índice Nacional de Precios al Consumidor. Obtenido de <https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa>

International Coffee Organization (ICO) 2017 ICO Annual Review 2017

Jain, A., Balasubramanian, R. and Srinivasan, M. (2016). Hydrothermal conversion of biomass waste to activated carbon with high porosity: A review. *Chemical Engineering Journal*, 283, pp.789-805.

Jeguirim, M., y Limousy, L. (Eds.). (2019). *Char and Carbon Materials Derived from Biomass: Production, Characterization and Applications*. Elsevier.

Jones, S. B., Zhu, Y., Anderson, D. B., Hallen, R. T., Elliott, D. C., Schmidt, A. J., ... & Kinchin, C. (2014). *Process design and economics for the conversion of algal biomass to hydrocarbons: whole algae hydrothermal liquefaction and upgrading* (No. PNNL-23227). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).

Kambo, H. S., and Dutta, A. (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 359-378.

Kasuya, M. C. M., da Luz, J. M. R., Nunes, M. D., da Silva, M. D. C. S., de Carvalho, D. R., de Assunção, L. S., and Bento, C. B. P. (2015). Production of selenium-enriched mushrooms in coffee husks and use of this colonized residue. In *Coffee in Health and Disease Prevention* (pp. 301-309). Academic Press.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., and Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Publications.

Kerzner, H. (2022). *Innovation project management: Methods, case studies, and tools for managing innovation projects*. John Wiley & Sons.

Khan, T. A., Saud, A. S., Jamari, S. S., Ab Rahim, M. H., Park, J. W., and Kim, H. J. (2019). Hydrothermal carbonization of lignocellulosic biomass for carbon rich material preparation: A review. *Biomass and bioenergy*, 130, 105384.

Kim, D., Lee, K., Bae, D., and Park, K. Y. (2017). Characterizations of biochar from hydrothermal carbonization of exhausted coffee residue. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(3), 1036-1043.

Kovács, G. (2017). First cost calculation methods for road freight transport activity. *Transport and Telecommunication*, 18(2), 107.

Kruse, A., and Dinjus, E. (2007). Hot compressed water as reaction medium and reactant: Properties and synthesis reactions. *The Journal of supercritical fluids*, 39(3), 362-380.

Laurio, M. V. O., and Slater, C. S. (2020). Process scale-up, economic, environmental assessment of vibratory nanofiltration of coffee extracts for soluble coffee production process intensification. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(9), 1891-1908.

Libra, J. A., Ro, K. S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N. D., Neubauer, Y., Titirici, M. M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J., Emmerich, K. H. (2011). Hydrothermal carbonization of biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*. 2 (1): 71-106. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.81>

Liu, Z., and Han, G. (2015). Production of solid fuel biochar from waste biomass by low temperature pyrolysis. *Fuel*, 158, 159-165.

López-Rodríguez, c. e., Cardozo, c. e., Monroy, I., y González, e. g. (2019). El impacto del valor económico agregado (EVA) en la valoración accionaria de las empresas colombianas entre los años 2015 al 2018. *Revista Espacios*, 40(43).

Lu, Y. and Savage, P. (2015). Supercritical water gasification of lipid-extracted hydrochar to recover energy and nutrients. *The Journal of Supercritical Fluids*, 99, pp.88-94.

Marzbali, M. H., Kundu, S., Patel, S., Halder, P., Paz-Ferreiro, J., Madapusi, S., & Shah, K. (2021). Hydrothermal carbonisation of raw and dewatered paunch waste: Experimental observations, process modelling and techno-economic analysis. *Energy Conversion and Management*, 245, 114631.

Mazzoni, L., and Janajreh, I. (2017). Plasma gasification of municipal solid waste with variable content of plastic solid waste for enhanced energy recovery. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(30), 19446-19457.

Medina-Meléndez, J. A., Ruiz-Nájera, R. E., Gómez-Castañeda, J. C., Sánchez-Yáñez, J. M., Gómez-Alfaro, G., y Pinto-Molina, O. (2016). Estudio del sistema de producción de café (*Coffea arabica* L.) en la región Frailesca, Chiapas. *CienciaUAT*, 10(2), 33-43.

Mete, M. R. (2014). Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. *Fides et Ratio-Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 7(7), 67-85

Murillo-Hernández, J.A. (2019) Bomba Calorimétrica. Instituto tecnológico y de estudios superiores de Monterrey Campus Santa Fe. Escuela de ingeniería y ciencias.

Montiel-Bohórquez, N. D., Agudelo, A. F., and Pérez, J. F. (2021). Effect of origin and production rate of MSW on the exergoeconomic performance of an integrated plasma gasification combined cycle power plant. *Energy Conversion and Management*, 238, 114138.

Morris, J. (2018). *Coffee: A global history*. Reaktion Books.

Nava-Pacheco, D. (2021). *Evaluación del hidrochar obtenido de n residuo citrícola como mejorador de suelos* (Maestra). Tecnológico Nacional de Mexico-Instituto Tecnológico de Orizaba.

Nizamuddin, S., Jaya Kumar, N., Sahu, J., Ganesan, P., Mubarak, N. and Mazari, S. (2015). Synthesis and characterization of hydrochars produced by hydrothermal carbonization of oil palm shell. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 93(11), pp.1916-1921.

OIC, (2014). Organización Internacional del Café. *Producción total de los países exportadores de los años de cosecha de 2014/15*. Recuperado el 23 de mayo de 2022, de: <http://www.ico.org/historical/1990%20onwards/PDF/1a-total-production.pdf>.

Oliveira, L. S., and Franca, A. S. (2015). An overview of the potential uses for coffee husks. *Coffee in health and disease prevention*, 283-291.

Ortiz-Martínez, S. A. (2020). *Evaluación de una propuesta para la obtención de cafeína partiendo de residuos de café generados por la industria cafetera* (Bachelor's thesis, Fundación Universidad de América).

Pancsira, J. (2022). International Coffee Trade: a literature review. *Journal of Agricultural Informatics*, 13(1).

Panggabean, Y. B. S., and Arsyad, M. (2021, July). Coffee farming business development: E-commerce technology utilization. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 807, No. 3, p. 032011). IOP Publishing.

Pérez-Burillo, S., Pastoriza, S., Fernández-Arteaga, A., Luzón, G., Jiménez-Hernández, N., D'Auria, G., and Rufián-Henares, J. A. (2019). Spent coffee grounds

extract, rich in mannoooligosaccharides, promotes a healthier gut microbial community in a dose-dependent manner. *Journal of agricultural and food chemistry*, 67(9), 2500-2509.

Pérez-Sánchez, O., Pérez-Vázquez, A., Lango-Reynoso, V., Gallardo-López, F., and Escamilla-Prado, E. (2022). Bibliographic analysis of sustainability studies in coffee agroecosystem from 2010 to 2019. *Agroproductividad*, 15(3).

Pinha, A. C. H., and Sagawa, J. K. (2020). A system dynamics modelling approach for municipal solid waste management and financial analysis. *Journal of Cleaner Production*, 269, 122350.

Qin, Z., Tang, Y., Zhang, Z., and Ma, X. (2021). Techno-economic-environmental analysis of coal-based methanol and power poly-generation system integrated with biomass co-gasification and solar based hydrogen addition. *Energy Conversion and Management*, 228, 113646.

Ramos-Hernández, R., Sánchez-Ramírez, C., Mota-López, D. R., Sandoval-Salas, F., and García-Alcaraz, J. L. (2021). Evaluation of bioenergy potential from coffee pulp through System Dynamics. *Renewable Energy*, 165, 863-877.

Renard, M. C. (2022). Values and the making of standards in 'sustainable' coffee networks: The case of 4C and Nestlé in México. *International Sociology*, 02685809221119289.

Romero-Anaya, A. J., Ouzzine, M., Lillo-Rodenas, M. A., & Linares-Solano, A. (2014). Spherical carbons: Synthesis, characterization and activation processes. *Carbon*, 68, 296-307.

Rosas-Mendoza, E. S., Palacios-Ríos, J. H., Méndez-Contreras, J. M., Vallejo-Cantú, N. A., and Alvarado-Lassman, A. (2020). Designing a supply chain for the generation of bioenergy from the anaerobic digestion of citrus effluents. In *Techniques, Tools and Methodologies Applied to Global Supply Chain Ecosystems* (pp. 209-235). Springer, Cham.

Rubén, R., Sfez, P., Pensioen, T., and Meneses, N. (2018). *Análisis Integral de la cadena de valor del café en Honduras: Informe final*. Wageningen University & Research.

Ruiz, V. R. L., and Peña, D. N. (2008). Análisis integral como sistema de medición y gestión de capitales intangibles en organizaciones y territorios. *Estudios de Economía Aplicada*, 26(2), 119-137.

SADER (2018). Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural. México, *onceavo productor mundial de café*. gov.mx. Recuperado el 23 de mayo de 2022, de

<https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/mexico-onceavo-productor-mundial-de-cafe?idiom=es>

Sahu, O. P., and Chaudhari, P. K. (2015). The characteristics, effects, and treatment of wastewater in sugarcane industry. *Water Quality, Exposure and Health*, 7(3), 435-444.

Sahu, S., Behera, B., Maiti, T. K., and Mohapatra, S. (2012). Simple one-step synthesis of highly luminescent carbon dots from orange juice: application as excellent bio-imaging agents. *Chemical communications*, 48(70), 8835-8837.

Saif, Y., Griffiths, S., and Almansoori, A. (2022). Municipal solid waste supply chain management under an integrated optimization of sustainability targets. *Computers & Chemical Engineering*, 160, 107725.

Samoggia, A. and Riedel, B. (2018), "Coffee consumption and purchasing behavior review: insights for further research", *Appetite*, Vol. 129, pp. 70-81.

Sánchez-Silva, J. M. (2022). Caracterización y revalorización del hueso de nanche (*byrsonima crassifolia*) y su aplicación como material adsorbente para la eliminación de contaminantes tóxicos del agua. *REPOSITORIO NACIONAL CONACYT*.

Schade, J. (2009). *Energy simulation and life cycle costs: estimation of a building's performance in the early design phase* (Doctoral dissertation, Luleå tekniska universitet).

SIAP, Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera (2014). *Cierre de la producción agrícola por estado*. Recuperado el 23 de mayo de 2022, de: <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agrico-la-por-estado/>

Snell, M. (2011), *Cost-Benefit Analysis. A Practical Guide*, 2nd ed., Thomas Telford, London.

Soco, M. (2021). Qué tipos de café se cultivan en México. *Directo al Paladar México*. <https://www.directoalpaladar.com.mx/ingredientes-y-alimentos/que-tipos-cafe-se-cultivan-mexico>

Soobhany, N. (2018). Assessing the physicochemical properties and quality parameters during composting of different organic constituents of Municipal Solid Waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(2), 1979-1988.

Speight, J. G. (2018). *Reaction Mechanisms in Environmental Engineering*. United States: Elsevier.

Talang, R. P. N., and Sirivithayapakorn, S. (2022). Comparative analysis of environmental costs, economic return and social impact of national-level municipal

solid waste management schemes in Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 343, 131017.

Tapia-Gómez, A. K., Laines-Canepa, J. R., & Sosa-Olivier, J. A. (2017). Codigestión de residuos sólidos orgánicos generados en las cafeterías de la división académica de ciencias biológicas co-digestion of organic solid waste generated in the cafeterias of the biologic sciences campus.

Teong, S. P., Yi, G., and Zhang, Y. (2014). Hydroxymethylfurfural production from bioresources: past, present and future. *Green Chemistry*, 16(4), 2015-2026.

Titirici, M. M., Antonietti, M., and Baccile, N. (2008). Hydrothermal carbon from biomass: a comparison of the local structure from poly-to monosaccharides and pentoses/hexoses. *Green Chemistry*, 10(11), 1204-1212.

Valencia, W. A. (2011). Indicador de rentabilidad de proyectos: el valor actual neto (van) o el valor económico agregado (eva). *Industrial data*, 14(1), 15-18.

Valeriano, C. M., Cantú, N. A. V., Lassman, A. A., Contreras, J. M. M., and Sibaja, A. M. (2021). Caracterización fisicoquímica de hidrochar, producido a partir de la fracción sólida de residuos de frutas y verduras y residuos cítricos. *RINDERESU*, 5(1).

Veltri, F., Alessandro, F., Scarcello, A., Beneduci, A., Arias Polanco, M., Cid Perez, D., and Caputi, L. S. (2020). Porous carbon materials obtained by the hydrothermal carbonization of orange juice. *Nanomaterials*, 10(4), 655.

Verhagen, S. (2019). Improving the Value of Spent Coffee Grounds by Converting Carbohydrates into Fermentable Sugars.

Vichi, F. F. (2015). La producción de café en México: ventana de oportunidad para el sector agrícola de Chiapas. *Espacio I+ D, innovación más desarrollo*, 4(7).

Wilk, M., Śliz, M., & Gajek, M. (2021). The effects of hydrothermal carbonization operating parameters on high-value hydrochar derived from beet pulp. *Renewable Energy*, 177, 216-228.

Xie, H., Cui, Q., and Li, Y. (2022). Net Present Value Method: A Method Recommended by ISO 15686-5 for Economic Evaluation of Building Life Cycle Costs. *World Journal of Engineering and Technology*, 10(2), 224-229.

Yildirim, O., and Karaca, O. B. (2022). The consumption of tea and coffee in Turkey and emerging new trends. *Journal of Ethnic Foods*, 9(1), 1-11.

Yip, K., Tian, F., Hayashi, J. I., and Wu, H. (2010). Effect of alkali and alkaline earth metallic species on biochar reactivity and syngas compositions during steam gasification. *Energy & Fuels*, 24(1), 173-181.

Yokoyama, M. (2020). News Medical. [https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Dehydration-Synthesis-\(Spanish\).aspx](https://www.news-medical.net/life-sciences/What-is-Dehydration-Synthesis-(Spanish).aspx) (consultado noviembre, 2021).

Zamora-Valencia, C. A. (2020). Síntesis de puntos cuánticos de carbono por el método hidrotermal y evaluación de sus propiedades ópticas.