



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA QUÍMICA DEL PROCESO
DE GASIFICACIÓN DE BRIQUETAS PROVENIENTES DE
CÁSCARA DE PAPA Y TUSA DE MAÍZ MEDIANTE ANÁLISIS
TERMOGRAVIMÉTRICO**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: WILSON ANDRÉS SAMANIEGO CHÁVEZ

DIRECTOR(A): ING. MABEL MARIELA PARADA RIVERA

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Wilson Andrés Samaniego Chávez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Wilson Andrés Samaniego Chávez, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 30 de noviembre de 2023



Wilson Andrés Samaniego Chávez
C.I. 0604543298

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; tipo: Proyecto de Investigación, **DETERMINACIÓN DE LA CINÉTICA QUÍMICA DEL PROCESO DE GASIFICACIÓN DE BRIQUETAS PROVENIENTES DE CÁSCARA PAPA Y TUSA DE MAÍZ MEDIANTE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO**, realizado por el señor: **WILSON ANDRÉS SAMANIEGO CHÁVEZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Darío Fernando Guamán Lozada MsC. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-11-30
Ing. Mabel Mariela Parada Rivera. Mgs. DIRECTORA DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-11-30
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes. MsC ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-11-30

DEDICATORIA

A Dios, a mis abuelos, a mis padres Wilson y Miria, a mi hermana Johana y a mis tías Elsa y Carmita.

Wilson

AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarme la oportunidad de cumplir con esta meta. A mis padres, hermana y tías, familia más cercana, por ser el soporte fundamental en todo en transcurso de mi vida y por la confianza depositada en mí. También a la Ing. Mabel Parada y Ing. Paul Palmay por la guía en todo el desarrollo y transcurso de esta investigación. Y a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo y Facultad de Ciencias por abrirme sus puertas para mi formación como profesional. Gracias por ser parte de mi desarrollo personal y académico.

Wilson

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS	xii
RESUMEN.....	xiii
SUMMARY	xiv
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1	DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA	2
1.1	Planteamiento del problema	2
1.2	Limitaciones y delimitaciones.....	2
1.2.1	<i>Limitaciones</i>	3
1.2.2	<i>Delimitaciones</i>	3
1.3	Problema general de la investigación.....	3
1.4	Problemas específicos de la investigación.....	3
1.5	Objetivos	3
1.5.1	<i>Objetivo general</i>	3
1.5.2	<i>Objetivos específicos</i>	4
1.6	Justificación	4
1.6.1	<i>Justificación teórica</i>	4
1.6.2	<i>Justificación metodológica</i>	4
1.6.3	<i>Justificación práctica</i>	5
1.7	Hipótesis	5

CAPÍTULO II

2	MARCO TEÓRICO	6
2.1	Antecedentes de investigación	6
2.2	Referencias teóricas.....	7
2.2.1	<i>Residuos agroindustriales</i>	7
2.2.1.1	<i>Maíz</i>	8
2.2.1.2	<i>Papa</i>	8
2.2.2	<i>Biomasa</i>	9
2.2.2.1	<i>Tipos de biomasa</i>	9
2.2.2.2	<i>Características de la biomasa</i>	10

2.2.3	<i>Briquetas</i>	11
2.2.3.1	<i>Procesos de Fabricación</i>	11
2.2.4	<i>Proceso de gasificación</i>	12
2.2.4.1	<i>Combustibles sólidos gasificables</i>	13
2.2.4.2	<i>Agentes gasificadores</i>	13
2.2.4.3	<i>Poder calorífico</i>	14
2.2.5	<i>Análisis</i>	14
2.2.5.1	<i>Análisis elemental</i>	14
2.2.5.2	<i>Análisis termogravimétrico de la biomasa</i>	14

CAPÍTULO III

3	MARCO METODOLÓGICO	16
3.1	Enfoque de investigación	16
3.2	Alcance de investigación	16
3.3	Diseño de investigación	16
3.3.1	<i>Según la manipulación o no de la variable independiente</i>	17
3.3.2	<i>Según las intervenciones en el trabajo de campo</i>	17
3.4	Tipo de estudio (documental /de campo)	18
3.5	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	18
3.5.1	<i>Secado forzado</i>	19
3.5.2	<i>Molienda y tamizado</i>	19
3.5.3	<i>Análisis termogravimétrico</i>	20
3.5.4	<i>Análisis Elemental</i>	21
3.5.5	<i>Modelado Cinético</i>	22

CAPÍTULO IV

4	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	23
4.1	Recopilación Bibliográfica	23
4.2	Análisis Elemental	24
4.3	Análisis Inmediato	24
4.3.1	<i>Humedad</i>	24
4.3.2	<i>Compuesto Volátiles</i>	24
4.3.3	<i>Ceniza</i>	25
4.3.4	<i>Carbono Fijo</i>	25
4.4	Análisis termogravimétrico	25
4.4.1	<i>Generación de datos para el modelado cinético</i>	27

4.5	Modelado cinético.....	28
4.5.1	<i>Modelo 1</i>	29
4.5.2	<i>Modelo 2</i>	32
4.6	Modelo planteado.....	36
4.7	Validación estadística.....	42
4.7.1	<i>Prueba F de Fisher</i>	42
4.7.2	<i>Función Objetivo Error (FOE)</i>	42
	DISCUSIÓN	45
	CONCLUSIONES	46
	RECOMENDACIONES	47
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Antecedentes de la Investigación	7
Tabla 4-1: Datos de Biomasa Seleccionada.....	23
Tabla 4-2: Resultados del Análisis Elemental	24
Tabla 4-3: Resultados Análisis Inmediato	25
Tabla 4-4: Parámetros cinéticos de gasificación, modelo 1	31
Tabla 4-5: Ecuación modelo cinético 1.....	31
Tabla 4-6: Modelos de reacción para la descomposición de biomasa	34
Tabla 4-7: Parámetros cinéticos de gasificación, modelo 2.....	35
Tabla 4-8: Ecuación modelo cinético 2.....	36
Tabla 4-9: Parámetros cinéticos y ecuación ajustados, modelo 1	37
Tabla 4-10: Parámetros cinéticos y ecuación ajustados, modelo 2.....	38
Tabla 4-11: Parámetros cinéticos y ecuación ajustados, picos mayoritarios, modelo 1	38
Tabla 4-12: Parámetros cinéticos y ecuación ajustados, picos mayoritarios, modelo 2	39
Tabla 4-13: Resultado del análisis estadístico para modelo 1.....	42
Tabla 4-14: Resultado del análisis estadístico para modelo 2.....	43
Tabla 4-15: Comparación del modelo propuesto con resultados cinéticos reportados para diferentes biomásas.	44

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Diagrama típico de TGA y DTG de biomasa en atmósfera de nitrógeno.	15
Ilustración 3-1: Diseño de Investigación.....	17
Ilustración 3-2: Diagrama de flujo de la metodología para análisis y modelado cinético.....	19
Ilustración 3-3: Metodología experimental desarrollada para el Análisis Termogravimétrico. 21	
Ilustración 4-1: TG en función del tiempo, 20 °C/min, 1mm.	26
Ilustración 4-2: DTG en función de la temperatura, 20 °C/min, 1mm.....	26
Ilustración 4-3: Identificación de temperatura de referencia en DTG.....	27
Ilustración 4-4: Conversión en función del tiempo, 20 °C/min, 1mm.	28
Ilustración 4-5: Resultado Modelo 1: $d\alpha/dt$ en función de la temperatura, 20 °C/min, 1mm. ..	31
Ilustración 4-6: Resultado Modelo 2: $d\alpha/dt$ en función de la temperatura, 20 °C/min, 1mm. ..	36
Ilustración 4-7: Resultado Modelo Ajustado I y Experimental, 20 °C/min, 1mm.	37
Ilustración 4-8: Resultado Modelo Ajustado II y Experimental, 20 °C/min, 1mm.....	38
Ilustración 4-9: Resultado Modelo Ajustado I y Experimental, picos mayoritarios, 20 °C/min, 1mm.	39
Ilustración 4-10: Resultado Modelo Ajustado II y Experimental, picos mayoritarios, 20 °C/min, 1mm.....	40
Ilustración 4-11: $d\alpha/dt$ (vs) temperatura, Experimental, Modelo 1 y Modelo Ajustado I.....	41
Ilustración 4-12: $d\alpha/dt$ (vs) temperatura, Experimental, Modelo 2 y Modelo Ajustado II.....	41

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

ANEXO B: IMÁGENES BIOMASA

ANEXO C: INFORME ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO

ANEXO D: MODELOS CINÉTICOS

RESUMEN

La demanda de combustibles, el agotamiento y precios de los combustibles fósiles, además de generación de significativas cantidades de residuos orgánicos de las industrias y población en general son algunas de las razones para la búsqueda y determinación de viabilidad de alternativas energéticas mediante la utilización de residuos, por esto, el objetivo de la presente investigación fue determinar la cinética química del proceso de gasificación de briquetas provenientes de cáscara de papa y tusa de maíz mediante análisis termogravimétrico. La metodología tuvo un enfoque cualitativo y cuantitativo, se utilizó un diseño experimental de tipo longitudinal utilizando varias variables a lo largo de un periodo de tiempo, también se aplicó una investigación documental y experimental, mediante métodos, técnicas e instrumentos como un análisis elemental, termogravimétrico y el modelado cinético. Por medio de esta metodología se obtuvieron datos de la producción anual de residuos de cáscara de papa y tusa de maíz; y del proceso de gasificación de biomasa que permitieron crear modelos con parámetros cinéticos: energía de activación (E) y factor pre exponencial (A) y su respectivo ajuste para minimizar el error entre los valores experimentales y calculados. Por tanto, se determinó la cinética química del proceso de gasificación de briquetas provenientes de cáscara de papa y tusa de maíz mediante análisis termogravimétrico, con dos modelos diferentes, además de la factibilidad del uso y aprovechamiento de estos residuos.

Palabras clave: <BIOMASA>, <CÁSCARA DE PAPA>, <TUSA DE MAÍZ>, <ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO>, <MODELOS CINÉTICOS>.

2078-DBRA-UPT-2023



SUMMARY

The demand for fuels, the depletion and prices of fossil fuels, and the generation of significant amounts of organic waste from industries and the population are some of the reasons for the search and determination of the viability of energy alternatives through garbage. Therefore, this research aimed to determine the chemical kinetics of the gasification process of briquettes from potato peel and corncob by thermogravimetric analysis. The methodology had a qualitative and quantitative approach, a longitudinal experimental design using several variables over time, documentary and empirical research, and operating methods, techniques, and instruments such as elemental analysis, thermogravimetric, and kinetic modeling were also applied. Data was used as a methodology to obtain on the annual production of residues of potato husk and corncob and the biomass gasification process that allowed the creation of models with kinetic parameters: activation energy (E) and pre-exponential factor (A) and their respective adjustment to minimize the error between the experimental and calculated values. Therefore, the chemical kinetics of the gasification process of briquettes from potato peel and corncob were determined by thermogravimetric analysis with two different models, in addition to the feasibility of using and exploiting these residues.

Keywords: <BIOMASS>, <POTATO PEEL>, <CORNCOB>, <THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS>, <KINETIC MODELS>.



Edison Renato Ruiz López

060395704-4

INTRODUCCIÓN

En nuestro país la principal actividad económica es la agricultura ya que esta ha sido una base de la oferta exportable del país por más de dos siglos, en los últimos años esta actividad ha constituido un puesto importante en las industrias de alimentos y bebidas teniendo así un crecimiento del 4.3 %, siendo para el PIB el 39% de la manufactura no petrolera.

En contraste de esta contribución económica, existe otra realidad que preocupa al medio ambiente y estos son los residuos agroindustriales producidos por las industrias. Estos residuos agroindustriales son materiales generados a partir del consumo directo o indirecto, mismo que se deriva del procesamiento de un producto, sin utilidad posterior. Se estima que el 80% de estos residuos son quemados inapropiadamente, el 15 % sirven como una fuente de alimento para animales, el 4.5 % son reincorporados al suelo sin ninguna descomposición previa y solo el 0.5% de estos son utilizados en industrias de aglomerados o papelería, aunque los residuos agroindustriales contienen un alto potencial que pueden ser aprovechados para la elaboración de productos innovadores (Vargas y Pérez , 2018, pp.60-70).

Con el propósito de hallar nuevas alternativas para combatir el calentamiento global se ha explorado otras alternativas para reemplazar el uso de combustibles fósiles, ejemplo, las biomásas, debido a que estas presentan diversas ventajas como fácil combustión, emisión neutral de carbono o contenido de celulosa por ello que su uso ha incrementado.

La biomasa es una fuente de energía renovable proveniente de los residuos de materia orgánica que se originan principalmente de actividades agropecuarias, forestales, industriales y de cultivos con fines energéticos, pero el uso de la biomasa como fuente alternativa de energía exige que se profundice el conocimiento de su disponibilidad, composición y potencial energético (ESIN, 2014, pp.5-7).

Por este motivo el presente trabajo de investigación se centra en la determinación de parámetros cinéticos del proceso de gasificación de biomasa en su forma de briquetas que están constituidas de residuos de papa específicamente la cáscara y la tusa de maíz, mediante un análisis termogravimétrico.

CAPÍTULO I

1 DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Las industrias alimentarias se han visto obligadas a producir grandes cantidades de alimentos debido la demanda generada por el aumento de la población, dando lugar a inmensas cantidades de residuos que provienen de cosechas agrícolas o de las distintas etapas de fabricación de un producto alimenticio. Un residuo es aquel material que se genera por la actividad humana el cual no tiene ningún valor económico (De Lucas Herguedas et al., 2012, p.27). Estos residuos agroindustriales al no tener un tratamiento adecuado o una reutilización son desechados o quemados provocando una enorme contaminación ambiental.

Ecuador uno de los países con gran producción agrícola, genera significativas cantidades de residuos, por lo que se busca una alternativa para aprovecharlos de mejor manera, ya que estos residuos resultan ser de mucha importancia porque aún contienen una composición energética que se puede aprovechar y explotar (ESIN, 2014, pp.5-7).

En los últimos años se ha estado introducido diferentes alternativas de combustibles, son los biocombustibles de los cuales la materia prima son recursos orgánicos, la evaluación en diversos aspectos generales como económico, ambiental y político son fundamentales para definir la factibilidad de esta nueva alternativa. La demanda de combustibles, el agotamiento y precios de los combustibles fósiles son algunas de las razones por las cuales diferentes países como el nuestro, Ecuador, desean la autosuficiencia energética. La aplicación de esta alternativa trae beneficios para el medio ambiente, incluyendo la reducción de los residuos orgánicos que se desechan diariamente y no tienen ninguna función (Villa, 2021, pp.3-5).

Por tal motivo el presente proyecto se centra en determinar la viabilidad de la producción de briquetas de biomasa de cáscara de papa y tusa de maíz, dándoles un uso posterior a estos residuos, para obtener una alternativa de fuente energía limpia y amigable con el medioambiente, analizando los parámetros de la cinética química en el proceso de gasificación.

1.2 Limitaciones y delimitaciones

1.2.1 Limitaciones

La cáscara de papa y tusa de maíz a ser residuos que se dan por temporada se debe tener muy en cuenta el tiempo de cosecha especialmente del maíz y obtener lo suficiente de materia para la producción de briquetas de biomasa en una escala industrial y sus respectivos análisis.

La molienda de la tusa de maíz, ya que es un material grueso y de alta dureza en comparación con la cáscara de papa, se necesita de un molino con una tolva.

El análisis termogravimétrico requiero de un equipo y software especial TG-GC-MS.

1.2.2 Delimitaciones

La cáscara de papa y tusa de maíz al ser desechos que se producen en gran cantidad su aprovechamiento se enfoca en utilizarlos como materia prima para la elaboración de briquetas y ser una nueva alternativa de energía, mediante un modelo cinético por medio de un análisis termogravimétrico para determinar la factibilidad y viabilidad de una producción a escala industrial.

1.3 Problema general de la investigación

¿Cuál es el comportamiento cinético dentro de un proceso de gasificación de briquetas de biomasa de cáscara de papa y tusa de maíz mediante análisis termogravimétrico?

1.4 Problemas específicos de la investigación

¿Según los resultados será factible la producción a gran escala de la briqueta de biomasa con la formula establecida y analizada?

¿Cuál será la energía de activación del proceso de gasificación?

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Determinar la cinética química del proceso de gasificación de briquetas provenientes de cáscara de papa y tusa de maíz mediante análisis termogravimétrico.

1.5.2 *Objetivos específicos*

- Determinar la factibilidad del uso de briquetas provenientes de cáscara de papa y tusa de maíz para su uso como biomasa en el proceso de gasificación mediante el análisis de la producción de residuos.
- Realizar el análisis termogravimétrico de la muestra de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz en condiciones de gasificación.
- Determinar la energía de activación del proceso.
- Identificar mediante validación estadística el margen de error entre los datos experimentales del análisis termogravimétrico y los datos de los modelos cinéticos planteados.

1.6 Justificación

1.6.1 *Justificación teórica*

Actualmente la agricultura es una de las áreas que más residuos genera a nivel industrial, al no tener un amplio conocimiento de su aprovechamiento estos residuos son amontonados o eliminados de una forma inadecuada provocando contaminación al ambiente y obstaculizando otras operaciones de cultivo.

De ahí formulación adecuada y la fabricación briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz para la utilización como biomasa requiere ciertos análisis para ver la factibilidad de producción a gran escala.

Por ello este proyecto va dirigido a determinación experimental de la cinética química de la gasificación de briquetas mediante análisis termogravimétrico y su dependencia de factores.

1.6.2 *Justificación metodológica*

Para esta investigación se procede con una pequeña muestra, pero representativa de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz que serán analizadas mediante termogravimetría, técnica que permite establecer los cambios de masa en función de tiempo y temperatura, bajo condiciones específicas de gasificación, obteniéndose así curvas TGA y DTG con lo que se genera un modelo y parámetros cinéticos.

1.6.3 *Justificación práctica*

Debido al bajo costo y elevada disponibilidad que tiene los residuos agroindustriales (cáscara de papa y tusa de maíz), algunas investigaciones se han enfocado en desarrollar nuevas alternativas tecnológicas para utilizar este tipo de residuos como materia prima para la producción de biocombustibles, productos químicos, pulpas, etc.

Lo que se persigue en esta investigación al determinar la factibilidad de utilizar productos agroindustriales (cáscara de papa y tusa de maíz) como materia prima para la elaboración de productos tales como briquetas que son biocombustibles 100% ecológicos que no producen ceniza y pueden ser utilizadas en diferentes áreas como chimeneas, estufas, hornos calderas, pero a una escala industrial.

1.7 Hipótesis

Con el proceso de gasificación de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz mediante un análisis termogravimétrico detallando condiciones, se podrá evaluar la factibilidad del proceso a gran escala.

CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de investigación

Mediante el aumento de la demanda de energía diversos estudios han promovido nuevas alternativas energéticas ya que las principales fuentes generadoras son de tipo no renovable y su combustión es un problema de contaminación medioambiental. La Agencia Internacional de Energía (IEA) admite que para mediados del siglo XX los combustibles fósiles fueron las fuentes primarias de energía, para finales del mismo siglo se promueve un nuevo modelo energético con una nueva alternativa de energía, la biomasa, en la actualidad esta es una de las fuentes de energía con mayor interés debido a que contiene recursos renovables como mitigador de emisión de gases de efecto invernadero (Paredes, 2015, pp.709-716).

Biomasa es una sustancia capaz de transformarse en combustible y producir energía siendo reconocida a esta como bioenergía, aunque son algunas las barreras a solventar para que se pueda utilizar industrialmente a gran escala como recurso energético (Paredes, 2015, pp.709-716).

La biomasa contiene una diversidad de materiales de diversos orígenes que contienen características diferentes. Las biomásas residuales que provienen del área agrícola en Ecuador son aprovechadas como fuentes de biocombustibles y subproductos. Sin embargo, hasta el momento estos residuos no han sido aprovechados eficientemente ya que presenta una variedad de dificultades técnicas siendo una de ellas la falta de información de cómo ser utilizada para su transformación. Los residuos agrícolas podrían convertirse para los agricultores un alto ingreso adicional al igual que el lado comercial (cosecha alimentaria) (De Lucas Herguedas et al. 2012, p.27).

Otra utilidad de la biomasa mediante un tratamiento adecuado, específicamente de pirolisis, es la producción de biocarbón, empleado para mejorar la calidad de suelos agrícolas. Desarrollando esta alternativa se da un valor agregado a los residuos orgánicos que se desechan de manera equivocada y se repara de alguna forma la contaminación del suelo. La producción de este biocarbón se lo realiza por un proceso de pirolisis en el que se obtiene gases de síntesis, compuestos de hidrocarburos, óxidos de carbono e hidrogeno y el biocarbón que posee residuos sólidos carbonosos (Gamboa, 2021, pp.6-7).

La generación de calor y electricidad partiendo de biomasa suele estar incentivada por motivos económicos que distintos países establecen para fomentar el uso de energías renovables y así promover la reducción de emisiones contaminantes y el desarrollo socioeconómico. Alemania está introduciendo el sistema retributivo conocido como “feed-in tariffs”, basado en incentivos a

los generadores de electricidad a partir de energías renovables. También, Reino Unido se ha convertido en un referente en cuanto al desarrollo de energías renovables durante los últimos años desde que en 2002 introdujese el sistema “Renewable Obligation Certificates” con el que impone a las compañías distribuidoras de electricidad distribuir un porcentaje de energía procedente de recursos renovables (Puente, 2017, pp.31-32).

Tabla 2-1: Antecedentes de la Investigación

FECHA	AUTOR	TEMA	ENLACE
2020	María Cortázar, Gartzen López, Jon Álvarez, Aitor Arregi, Maider Amutio, Javier Bilbao, Martín Olazar	Estudio experimental y modelado de la cinética de gasificación del char de biomasa en un novedoso reactor de flujo termogravimétrico.	https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S138589472031192X?via%3Dihub
2019	Ardilla Barragán Marco Antonio	Modelo Cinético para el proceso de Gasificación de Briquetas de Carbón con biomasa en Reactor de Lecho Fijo.	https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/handle/001/3688/Modelo_cinetico_proceso_de_gasificacion.pdf?sequence=1
2019	Bastidas Iturralde Dario Xavier y Miño Puente Naimes Alexander	Caracterización comparativa del proceso de pirólisis de dos biomásas.	http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/19356/1/T-UC-0017-IQU-052.pdf
2017	Regalado Castro Diana Carolina y Marín Vega Katty Michelle	Determinación de Parámetros Cinéticos en la combustión de Raquis de Banano y Tallos de Rosas	http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/11535/1/T-UC-0017-0026-2017.pdf
2015	Susana Martínez Lera	Modelado y Análisis de Sistemas de co-gasificación de biomasa y residuos plásticos.	https://zagan.unizar.es/record/30659/files/TESIS-2015-020.pdf

Realizado por: Samaniego W., 2023

2.2 Referencias teóricas

2.2.1 Residuos agroindustriales

Referido a todo tipo de materiales sólidos o líquidos resultantes del uso primario de un producto para consumo humano o de su procesamiento industrial. Los residuos no se utilizan en el proceso de su generación, sino que se utilizan para transformarlos en otros productos comerciales y de interés público. Estos derivados de la agroindustria se producen en grandes cantidades en todo el mundo y han demostrado ser una excelente fuente de biomasa lignocelulósica, fácilmente disponibles y son de muy bajo valor monetario. El aprovechamiento de esta enorme cantidad de desechos no se está realizando de manera correcta, ya que solo una pequeña parte se utiliza para alimentar a los animales, como fuente de energía en los hogares o plantas de fabricación, y la mayoría de ellos se queman, creando el problema de la contaminación ambiental (Vargas y Pérez, 2018, pp.60-62).

2.2.1.1 *Maíz*

Nombre científico “*Zea mays*”, considerado uno de los cultivos más importantes del mundo por su gran facilidad de adaptarse a diversas condiciones ecológicas y edáficas. Se puede desarrollar en una gran variedad de ambientes y climas, que van desde el trópico hasta los climas templados, desde el nivel del mar hasta altitudes de 300 msnm, latitudes ecuatoriales entre 23° norte y 23° sur desde el Ecuador. La superficie de maíz suave cosechada en choclo en todo el país fue de 39401 ha, con una producción de 4327 Tm, de las cuales 1446 Tm fueron producidos en la provincia de Chimborazo (Izquierdo, 2012, pp.18-23).

En la actualidad el maíz en nuestro país es el principal cereal, se cultiva ampliamente y sustenta parcialmente la economía, dependiendo de la variedad de maíz se puede cultivar en altitudes desde los 2000 hasta los 3100 msnm. En general, la mayoría de los cultivadores siembran desde septiembre hasta mediados de enero. El maíz se adapta bien a suelos profundos, ya que este es rico en materia orgánica y además tiene buen drenaje. El pH óptimo para el crecimiento es entre 5,5 y 7,5 (INIAP, 2012, pp.1-10).

La biomasa residual del maíz se puede utilizar para producir biocombustibles en un proceso eficaz y amigable con el ambiente. Aprovechando el gran potencial de estos residuos, será posible reducir la quema de estos residuos agrícolas en los campos y, así, la contaminación del medio ambiente (Sanaguano, 2021, pp.7-9).

2.2.1.2 *Papa*

“*Solanum tuberosum L*” nombre científico de la papa, es una dicotiledónea herbácea, rastrera o erecta, a menudo con tallos gruesos y robustos con entrenudos corto (Pumisacho y Sherwood, 2002, p. 33).

En Ecuador en la parte de la Sierra, esta planta se cultiva en regiones templadas y frías, con temperaturas que oscilan entre los 6°C y los 18°C y precipitaciones de 600 a 1200 mm. La papa

se desarrolla de mejor manera en suelos arcillosos, bien drenados y húmedos, ricos en materia orgánica y nutrientes (Pumisacho y Sherwood, 2002, pp.33-35).

La papa es la principal fuente de alimento para los habitantes de las zonas altas del país, con un consumo anual per cápita que varía según las ciudades. El 90% de la papa a nivel nacional se consume en estado fresco, y sus usos industriales son muy variados generando residuo (cáscara) en gran cantidad, también se obtiene de la papa almidón y alcohol (Pumisacho y Sherwood, 2002, p.24).

El cultivo de la papa tiene siete etapas definidas: comienza con la germinación de la semilla y finaliza con la cosecha. Los primeros cuatro pasos se conocen como fase vegetativa, las siguientes dos etapas conforman la etapa reproductiva y la última etapa es la fase de madurez. Para iniciar la cosecha de papa, es importante determinar y verificar si los tubérculos están maduros, es importante tomar en cuenta que, dependiendo de la variedad, la temporada de crecimiento de la papa es de 127 a 200 días después de la siembra (Araujo et al., 2021, pp.17-19).

2.2.2 Biomasa

Biomasa en el sector energético se define como un combustible que es originario de productos y residuos naturales, incluyendo sustancias vegetales y animales, estos residuos naturales pueden ser originarios de la agricultura, actividades forestales e industrias relacionadas al bosque, también derivados de jardinería y los desechos de alimentos (Basu, 2018, p.50-51).

Considerada un recurso de energía renovable con gran futuro y viabilidad, ya que se realizan diferentes estudios en cuanto a su aplicación, debido a que la biomasa se puede transformar en bioenergía (calor y electricidad), además en biocombustibles (sólidos, líquidos y gaseosos) (Kongto et al., 2022, p.5641).

2.2.2.1 Tipos de biomasa

Según su origen

- **Natural**

Este tipo de biomasa se forma de manera espontánea en la naturaleza, específicamente en lugares donde no exista o haya sufrido intervenciones humanas, su explotación no es atractiva por razones de su economía debido a que la gestión de la adquisición y transporte de la materia al lugar de utilización no son rentables (De Lucas Herguedas et al., 2012, pp.4-10)

- **Residual**

Son biomásas que proceden de residuos que son generados por el desarrollo de actividades humanas estos residuos se pueden clasificar en secos y húmedos, sólidos o húmedos.

Residuos de actividades agrícolas, forestales y de jardinería: son las pajas de cereales, excedentes agrícolas, zuros de maíz, etc.

Residuos de industrias agrícolas y forestales: Son los que provienen de la fabricación de aceite de oliva, industria vinícola y alcoholera

Residuos ganaderos: Son los denominados purines

Residuos agroindustriales: Son generados mediante cualquier proceso productivo y no son de utilidad posterior para la cadena de producción teniendo así a los residuos de las industrias lácteas, papeleras, almazaras, etc.

- Cultivos energéticos

Son cultivos con fines no alimenticios que su prioridad es producir energía, los residuos agro-energéticos suelen ser especies caracterizadas por su robustez con el fin de abaratar los costos de cultivo (De Lucas Herguedas et al., 2012, pp.4-10).

Según su estado

- Biomasa sólida

Son las más conocidas debido a que en su grupo engloba la madera que se obtienen de tratamientos silvícolas forestales, residuos de las industrias que laboran con cualquier tipo de biomasa y residuos obtenidos en las podas.

- Biomasa líquida

En este grupo se encuentra los residuos ganaderos, residuos de industrias biodegradables

- Biomasa gaseosa

Aquí podemos encontrar el metano o biogás que se obtienen a partir de residuos de animales, agroalimenticios, vertederos y escombreras.

2.2.2.2 Características de la biomasa

- Composición química

Los tipos de biomasa incluyen una parte orgánica, una parte inorgánica y agua. Durante la combustión, la parte orgánica se quema, la parte inorgánica afecta el proceso de combustión y forma cenizas o residuos sólidos. La composición química de la biomasa primaria se puede encontrar analizando los elementos más importantes, como el carbono (C), el hidrógeno (H), el nitrógeno (N), el azufre (S) y, en algunos casos, el cloro (Cl). También contiene oxígeno (O), pero este elemento no se determina directamente, sino que se calcula a partir de la diferencia entre el peso total y la suma de los demás elementos más la ceniza. (De Lucas Herguedas et al., 2012, pp.4-10).

- Humedad

Se denomina humedad relativa y es la relación de la masa de agua presente en un kilogramo de peso seco. El contenido de humedad de la biomasa se puede medir seco (h) o húmedo (H). Cuanto menor sea este contenido, mejor será el poder calorífico de esta biomasa y mejor será el proceso de combustión, ya que, al quemar la biomasa el agua primero debe evaporarse antes de

que se presente el calor. La mayoría de los procesos de conversión de energía requieren menos del 30 % de humedad relativa. A valores superiores, es necesario realizar operaciones de acondicionamiento y secado antes de la transición energética. (De Lucas Herguedas et al., 2012, pp.4-10)

- **Porcentaje en cenizas**

Indica la masa de sólidos no quemados por kg de material. Si el contenido de cenizas es muy alto, el producto no es recomendable para utilizarlo como biomasa, ya que eliminar este contenido demandara mayor esfuerzo y por consiguiente ocasiona costos adicionales. En algunos casos este material puede ser reutilizado tal como las cenizas de la cascarilla de arroz que son utilizadas para fabricar filtros de carbón o en la mezcla de concreto se puede adicionar para una mejor consistencia y calidad (Moya, 2017, p.20).

- **Densidad aparente**

Es el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que presenta, combustibles con alta densidad aparente favorecen la relación de energía por unidad de volumen requiriendo menores tamaños de los equipos y aumentando los periodos entre cargas, mientras materiales con baja densidad aparente necesitan mayor volumen de almacenamiento y transporte (Moya, 2017, p.20)

- **Materiales volátiles**

Son desprendimientos gaseosos de la materia orgánica e inorgánica durante el calentamiento o combustión de la biomasa estos pueden contener sustancias como metano, dióxido de carbono, y otros que contribuyen a aumentar el efecto invernadero (Moya, 2017, p.20).

2.2.3 Briquetas

Son una forma de aglomeración o densificación de materiales de biomasa y mezclas, con lo cual se mejora técnica y económicamente el manejo almacenamiento, transporte y poder calorífico volumétrico en la producción de energía y gasificación. Hoy las briquetas según el nivel de compactación pueden ser de alta presión media presión con calentamiento y baja presión con aglutinante (Ardilla, 2019, p.25).

Para la producción de briquetas, la materia prima debe ajustarse a condiciones como porcentaje de humedad y tamaño de partícula aceptables.

2.2.3.1 Procesos de Fabricación

Basados en la tecnología que se usa para la fabricación de briquetas se clasifican en:

Artesanales

Aquí, no hay dispositivos complicados porque no se requiere fabricación en masa, se usa solo medios primarios, la biomasa mezclada con algún tipo de aglutinante se puede prensar en moldes, luego secar y usar. La presión de compactación es baja, un promedio de hasta 5 MPa, debido al uso de una gran cantidad de aglutinante, que favorece la cohesión entre las partículas del material. Generalmente se utilizan aglutinantes como desechos animales, papel, aserrín, almidón, etc (Fonseca y Tierra, 2011, pp.18-22).

Semi-industriales

En este tipo de proceso, la presión de compactación varía entre 5 y 100 MPa. El proceso de producción suele ser continuo con una producción de briquetas de tamaño mediano. El contenido de humedad del material debe estar en el rango de 15-20%, si la humedad es alta, debido a la alta presión interna durante la compresión, hará que la temperatura generada durante la compresión genere una mayor cantidad de vapor de agua, por lo que la briqueta se agrietará en la superficie o provocará una explosión cuando se enfríe.

En este caso se utiliza menor cantidad de aglutinante debido a las altas presiones a las que la mezcla está sometida (Fonseca y Tierra, 2011, pp.18-22).

Industriales

En procesos industriales, se realizan con compactadores de alta presión de más de 100 MPa y altas tasas de producción continua. No se requiere necesariamente aglutinante, pero es esencial obtener la materia prima lo más seca posible, con un contenido de humedad de 5 a 15% en base húmeda, con tamaños de partículas menores a 15 mm ante estas presiones.

Debido a la temperatura elevada durante la compactación, la misma mezcla o materia prima se aglomerará por ser un material lignocelulósico que aporta su propia lignina como aglomerante.

En algunas industrias o plantas briquetadoras se utilizan secadores, trituradoras, tamices, filtros y colectores de polvo; las briquetadoras con resistencia eléctrica soportan la auto aglomeración, obteniéndose así, briquetas de alta calidad con buenas propiedades mecánicas, favorables al transportar y almacenarlas. (Fonseca y Tierra, 2011, pp.18-22).

2.2.4 *Proceso de gasificación*

Proceso termoquímico que transforma materiales de carbón y biomásas, en un combustible o gas sintético iniciando en la oxidación parcial a altas temperaturas. El resultado es gas que tiene en composición hidrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono, alquitrán, agua y mínimas cantidades de otros hidrocarburos. Este gas tiene un bajo poder calórico, de 4 a 7

MJ/m³ pero, si se utiliza como agente oxidante el oxígeno se puede estar de 10 a 18 MJ/m³ (Rezaiyan y Cheremisinoff, 2005, pp.5-10).

El objetivo de la gasificación es sacar la mayor capacidad calorífica del combustible sólido, transformando todos los componentes orgánicos en gases combustibles con diferentes aplicaciones como la generación térmica entre otras.

El proceso de gasificación de biomásas consta de diferentes etapas: secado, pirólisis, oxidación y gasificación (Ardilla, 2019, p.28-29).

- Secado

Donde se evapora el agua residual, a una temperatura de 100 °C en promedio.

- Pirólisis

Se obtiene un char, entre temperaturas de 300 y 450 °C soltando materia volátil del combustible sólido, con contenidos variables de hidrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono, agua, alquitrán, olefinas. El semicoque contiene compuestos orgánicos e inorgánicos (Ardilla, 2019, p.28-29).

- Oxidación

Se inyecta aire (oxígeno) al gasificador, aquí los productos de la etapa de pirólisis se oxidan y se obtiene la energía térmica requerida por las reacciones. (Ardilla, 2019, pp.28-29).

- Gasificación

La producción de gas empieza luego de la oxidación por la combustión incompleta del char, progresando en función del agente gasificador y de las condiciones de reacción, una vez que las temperaturas superan los 600 °C (Ardilla, 2019, pp.28-29).

2.2.4.1 *Combustibles sólidos gasificables*

En los últimos años el interés por el uso de recursos renovables para generación energética aumentado, promoviendo el desarrollo y uso de mezclas combustibles sólidos como: biomásas de madera con carbones, desechos de madera, cultivos herbáceos, materia fecal de animales, desechos de cosechas y residuos industriales (Ardilla, 2019, p.30).

2.2.4.2 *Agentes gasificadores*

Se puede proveer de oxígeno con un alto grado de pureza, o mezclas como el aire, la opción más simple y económica de proveer oxígeno al proceso de gasificación, es suministrar aire comprimido, aunque, el aire sin humedad contiene un 21 % oxígeno, 78 % nitrógeno, 0.93% argón, y 0.04% de otros gases. En esta composición, los gases diferentes al oxígeno son inertes, dando como resultado la disolución el gas reactivo y arrastre calor del proceso (Ardilla, 2019, p.31).

2.2.4.3 *Poder calorífico*

El valor calorífico se define como la cantidad máxima de calor que se puede extraer del combustible sólido cuando se quema por completo y sus productos se enfrían a la temperatura de la mezcla de aire y combustible, este calor se lo cuantifica en unidades de Joules, calorías o BTU, dependiendo del sistema utilizado. El vapor de agua está en los productos de combustión y, en función de la temperatura del producto, el vapor de agua puede quedarse en forma de vapor, parcial o totalmente condensado. Ya que el vapor de condensación libera calor, cuanto más condensado se genera, más calor se extrae del combustible (Garcés y Martínez, 2007, pp. 24-25).

2.2.5 *Análisis*

2.2.5.1 *Análisis elemental*

Técnica para obtener el porcentaje en peso de los elementos presentes y que conforman la estructura molecular de la materia orgánica: Nitrógeno (N), Carbono (C), Oxígeno (O) y Azufre (S). Se lo realiza tanto para combustibles sólidos como líquidos (Encalada y Jácome, 2018, p.12)

Conociendo los elementos constituyentes, se puede establecer las reacciones de oxidación, por ejemplo determinando la composición química de los materiales (Basu, 2018, p.73).

2.2.5.2 *Análisis termogravimétrico de la biomasa*

Para conocer los cambios de masa en función del tiempo o temperatura, se utiliza la técnica de la termogravimetría, aquí la muestra se expone a temperaturas y una atmósfera específica para obtener la curva de pérdida de masa o curva termogravimétrica (TGA) y la curva termogravimétrica derivativa (DTG) (Skoog, Holler y Crouch, 2008, pp.894-895).

El resultado de los análisis termogravimétricos son las curvas TGA (pérdida de masa en función del tiempo) y DTG (velocidad de variación de masa). La ilustración 2-1 especifica un termograma típico de los análisis de TGA, donde se presenta el porcentaje de peso de la muestra en el eje y, que puede estar en porcentaje o en valor absoluto, y en el eje x, la temperatura o tiempo; se visualiza, además, las etapas características de la descomposición de biomasa, etapa 1 deshidratación, etapa 2 pirolisis activa y finalmente la etapa 3 que corresponde a la pirolisis pasiva.

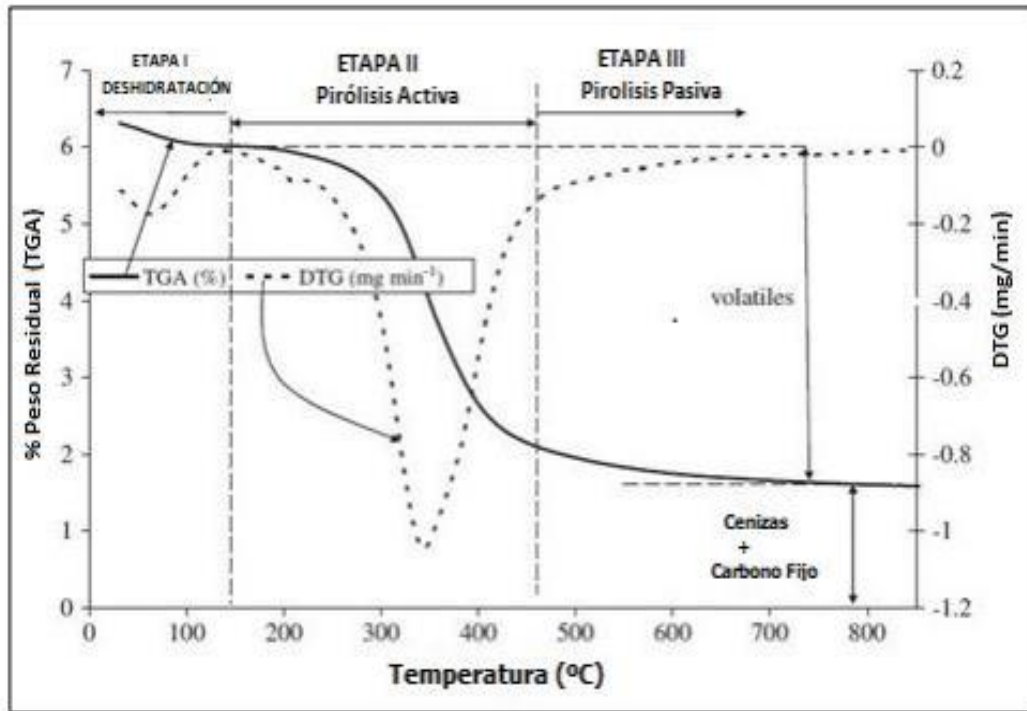


Ilustración 2-1: Diagrama típico de TGA y DTG de biomasa en atmósfera de nitrógeno.

Fuente: (Punia y Kumar, 2014, pp.8-9)

CAPÍTULO III

3 MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque de investigación

La presente investigación posee dos enfoques, uno cualitativo donde se evalúa diferentes tipos de briquetas de biomas para definir cuál es más factible analizar y producir a gran escala y un enfoque cuantitativo ya que se realizarán diversos análisis para generar datos y resultados números y así establecer la relación entre variables tanto independiente con las dependientes.

Esta investigación forma parte del Grupo de Investigación en Materiales Avanzados GIMA en el proyecto denominado Analizar Materiales y Nanomateriales para Aplicaciones Energéticas y Medio Ambientales, para establecer la factibilidad del uso de briquetas de biomasa en el proceso de gasificación en una escala industrial para la generación de energía verde con un impacto mínimo al medio ambiente.

3.2 Alcance de investigación

El trabajo de investigación propuesto se puede definir como un estudio descriptivo, realizando una revisión bibliográfica de la cantidad de desechos de cáscara de papa y tusa de maíz en nuestro país y estudios realizados sobre biomasas como un biocombustible, para la viabilidad de producción de briquetas a gran escala; y un estudio exploratorio con un análisis elemental y termogravimétrico para la creación de modelos cinéticos de la gasificación de la esta biomasa, para dar lugar a posteriores investigaciones como, la gasificación a gran escala, diseño de reactor para la combustión y gasificación de briquetas o nuevas interrogantes que surgen el proceso de obtención de energía limpia.

3.3 Diseño de investigación

El proyecto de investigación es de carácter experimental debido a que para determinar de la cinética química del proceso de gasificación de briquetas provenientes de cáscara de papa se realizará un análisis termogravimétrico y elemental de la muestra de biomasa a escala de laboratorio.

Con un diseño experimental aleatorio que se detalla continuación, que a partir de los datos generados en el análisis termogravimétrico permiten obtener modelos cinéticos.

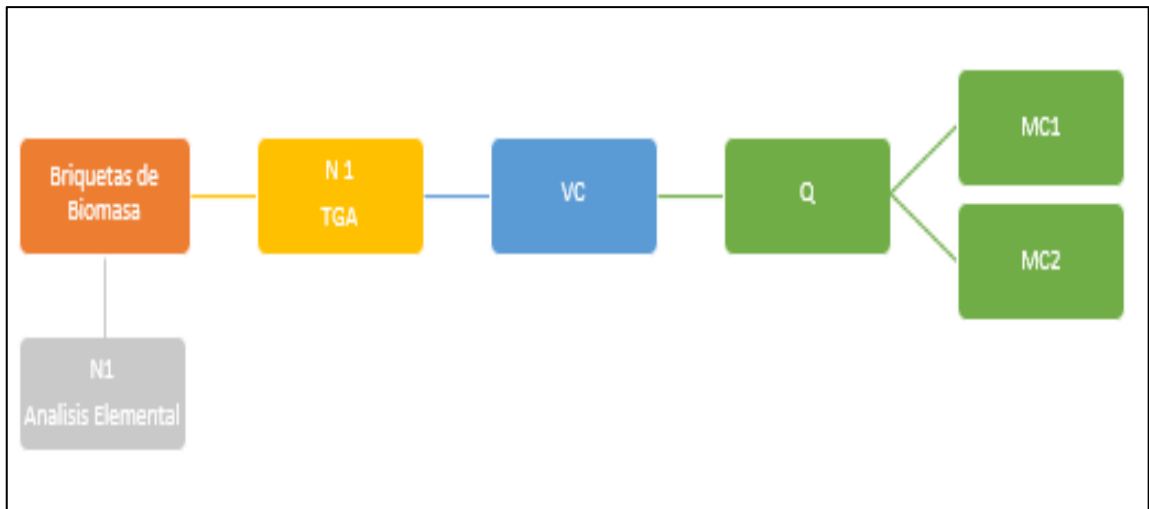


Ilustración 3-1: Diseño de Investigación

Realizado por: Samaniego W., 2023

Dónde:

N: Número de Análisis

VC: Velocidad de Calentamiento

Q: Flujo de Gas

MC: Modelos Cinético

Con una muestra de las briquetas de biomasa se realiza un análisis termogravimétrico a una velocidad de calentamiento (20 °C/min) y un flujo de gas (nitrógeno 20 mL/min y aire 2 mL/min), permitiendo establecer dos modelos diferentes, también parte de la muestra de biomasa se destina para un análisis elemental.

3.3.1 Según la manipulación o no de la variable independiente

El trabajo investigativo es de tipo experimental donde se encontrarán las siguientes variables.

- Variable independiente

Velocidad de Calentamiento (20 °C/min.)

Tamaño de partícula (1mm)

- Variable dependiente o variable respuesta

Energía de Activación (E, kJ/mol).

Factor Pre exponencial (A, s⁻¹).

3.3.2 Según las intervenciones en el trabajo de campo

Longitudinal

La investigación por desarrollarse es de campo longitudinal ya que se llevará a cabo un estudio utilizando varias variables a lo largo de un periodo de tiempo y se recopilará datos basados en dichos estudios experimentales.

Además, esta investigación es parte de una secuencia que inicia en la evaluación de residuos orgánicos con un alto potencial calorífico luego, el análisis proximal y la determinación de poder calorífica de diferentes biomásas y la fabricación de briquetas, realizadas en otras investigaciones, encontrándonos en la etapa de evaluación de biomásas que presenta un alto poder calorífico y que residuos de las que están conformadas las briquetas se generan en mayor cantidad en nuestra zona y país. Seleccionada la briqueta se realiza la determinación de cinética química (parámetros cinéticos) de la gasificación mediante un análisis termogravimétrico.

3.4 Tipo de estudio (documental /de campo)

El tipo de estudio que se realizará en el presente proyecto de investigación es documental y experimental. Documental ya que se selecciona y recopila información de fuentes bibliográficas confiables, datos de briquetas de biomasa como, poder calorífico, residuos de los que están conformados y la generación de estos a nivel del país. También se recaba información de diversos trabajos de modelado cinético de combustión y gasificación de diferentes biomásas y condiciones. Experimental a escala de laboratorio con un análisis termogravimétrico de biomasa de tusa de maíz con cáscara de papa obteniendo datos que permitan crear un modelo con parámetros cinéticos de la gasificación de la biomasa.

3.5 Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

Para la determinación del modelo cinético de biomasa de tusa de maíz con cáscara de papa se debe realizar una serie de metodologías las cuales se detallan a continuación.

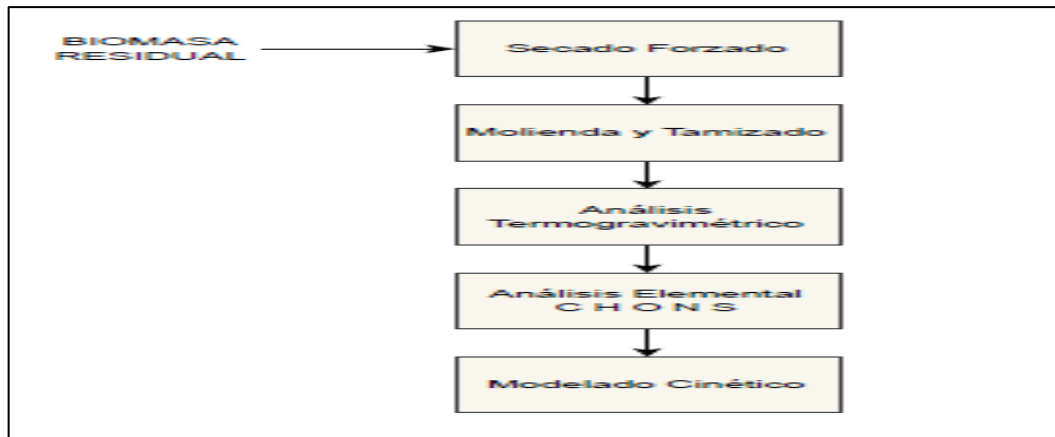


Ilustración 3-2: Diagrama de flujo de la metodología para el análisis y modelado cinético.

Realizado por: Samaniego W., 2023

3.5.1 *Secado forzado*

Retirar la humedad de la muestra de briqueta de biomasa, ya que para procesos de conversión energética y evitar que se forme una pasta, la humedad de las muestras debe ser inferior al 10 %.

Procedimiento

- Colocar la muestra en una bandeja y ubicar dentro del secador.
- Dejar secar la briqueta por 48 horas a 50°C.

Materiales y Equipos

- Secador (Equipo)
- Bandeja
- Biomasa de cáscara de papa y tusa de maíz (CPTM)

3.5.2 *Molienda y tamizado*

Se reduce el tamaño de la partícula hasta que sea igual o menor a 1 mm y homogenizar la muestra.

Procedimiento

- Moler la muestra de briqueta hasta obtener el tamaño ideal de partícula.
- Tamizar el producto obtenido.
- Recoger la muestra homogenizada y colocarla en un empaque hermético.

Materiales y Equipos

- Molino
- Tamices
- Empaque hermético

3.5.3 *Análisis termogravimétrico*

Con el análisis termogravimétrico se realiza la cuantificación de los cambios de masa en función del tiempo o temperatura, la muestra se expone a temperaturas y una atmósfera específica para obtener la curva de pérdida de masa o curva termogravimétrica (TGA) y la curva termogravimétrica derivativa (DTG) (Skoog, Holler y Crouch, 2008, pp.894-895).

Mediante los datos obtenidos se pueden establecer modelos cinéticos de gasificación de biomasa.

Procedimiento

- Abrir el suministro de gas (Nitrógeno), asegurarse que la presión de los tanques se mantenga a 150 psi; asegurarse que la presión de salida no exceda los 50 psi, ya que existe el peligro de dañar los equipos si la presión excede los límites requeridos.
- Encender el Minichiller, la temperatura requerida de dicho equipo debe ser de 21,3 °C.
- Encender el ordenador que contiene el software de TGA, iniciar el programa.
- Seguidamente se procede a encender el equipo de la TGA.
- Abrir el suministro de gases.
- Tarar el equipo, esperar hasta que la balanza se estabilice a una temperatura de 25°C.
- Para abrir la puerta del equipo tener en cuenta que no se puede abrir a una temperatura mayor de 30 C, ya que existe el riesgo de romper los anillos reflectores por el choque térmico.
- Proceder a cargar la muestra en el mini crisol con una espátula y aplastar, una cantidad de 8-10 mg, tapar el mini crisol. Asegurarse que este bien tapado con el borde hacia abajo, cerciorarse que el mini crisol no tenga restos por fuera, si es así soplar aire comprimido.
- Procede a poner el mini crisol en la balanza, cerrar la puerta.
- Cuando ya esté estable, se procede a comenzar el experimento.
- Seleccionar flujos: nitrógeno a 20 mL/min hasta los 500 °C; aire a 2 mL/min hasta los 800 °C.
- Seleccionar la velocidad de calentamiento 20 °C/min.

- Programar un proceso dinámico, el cual inicia con una etapa de calentamiento de 25°C hasta 500°C.
- A continuación, las biomásas se someten a una segunda etapa de calentamiento hasta llegar a 800°C, donde se mantiene constante un periodo isotérmico por 5 min. En este método se mantiene constante al caudal y una atmósfera inerte por lo cual el contenido sobrante del crisol corresponde a la presencia de cenizas y carbono fijo sin combustionar (Encalada y Jácome, 2018, pp.19-20).

Materiales y Equipos

- Equipo TGA.
- Muestra de biomasa.

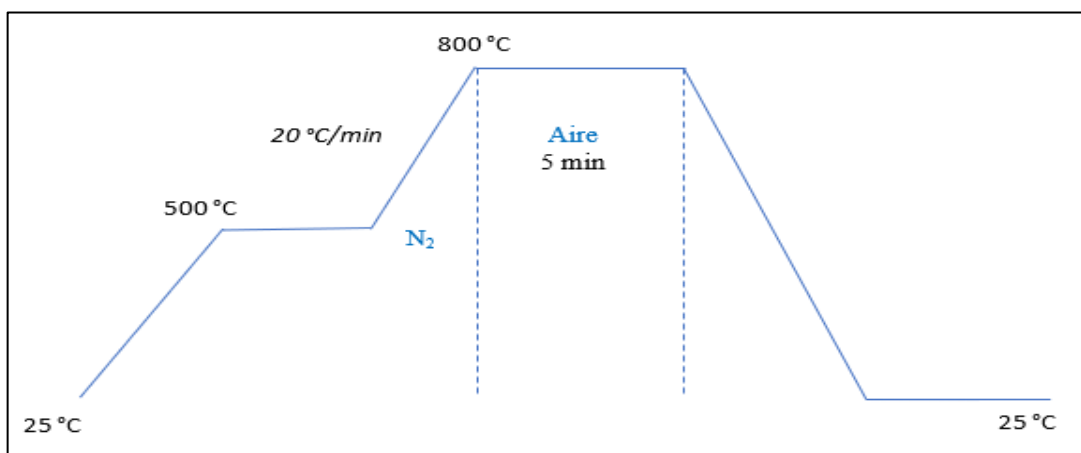


Ilustración 3-3: Metodología experimental desarrollada para el Análisis Termogravimétrico

Realizado por: Samaniego W., 2023

3.5.4 Análisis Elemental

Procedimiento

- Pesar la muestra analizar.
- Colocar las muestras en un crisol, con ayuda de pinzas cerrar el crisol.
- Ubicar el crisol sobre la bandeja del equipo.
- Encender el equipo.
- Generar los datos para analizar posteriormente.

Materiales y Equipos

- Analizador Elemental Orgánico
- Balanza analítica
- Crisoles

3.5.5 *Modelado Cinético*

Partiendo de los datos obtenidos en el análisis termogravimétrico se formulan dos modelos cinéticos diferentes.

Procedimiento

- Transportar datos generados por el software del equipo del análisis termogravimétrico hacia Excel.
- Generar gráficas TG y DTG
- Obtener datos para los modelos cinéticos.
- Realizar análisis y resolución matemática de las ecuaciones específicas para cada modelo cinético.
- Obtener parámetros cinéticos, energía de activación y factor pre exponencial.
- Generar gráficas de cada modelo.
- Analizar las gráficas, comparando los datos calculados por los modelos generados con los datos experimentales obtenidos por el análisis termogravimétrico.
- Realizar ajustes de los modelos (disminuir error entre las curvas).
- Definir la factibilidad del proceso.

Materiales y Equipos

- Excel de Microsoft Office 360
- Datos generados del análisis termogravimétrico

CAPÍTULO IV

4 MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Recopilación Bibliográfica

Se recopiló datos bibliográficos de investigaciones anteriores (tesis y artículos) de diferentes autores y biomásas con distintas formulaciones de residuos agroindustriales, datos de humedad y de poder calorífico de cada una de estas. Se evaluó todos estos parámetros para determinar que biomasa es más factible producir a gran escala en forma de briquetas considerando el origen de los residuos y la generación de estos en el país, para complementar con un análisis elemental y termogravimétrico del proceso de gasificación de la biomasa establecida. En el Anexo A se encuentra la matriz completa de datos.

Basado en los parámetros mencionados, la briqueta de biomasa seleccionada que tiene una composición de 30% cáscara de papa y 70% tusa de maíz, un poder calorífico de 41994,2 J/g. La materia prima de estas briquetas de biomasa es la papa específicamente la cáscara que representa el 2% del total de producción de tonelada por año, significando 8420 tonelada por año de residuo y la tusa maíz que representa el 18% del total de producción con un valor de residuo de 244552 toneladas por año. La siguiente tabla presenta los datos de la briqueta de biomasa seleccionada

Tabla 4-1: Datos de Biomasa Seleccionada

Materia Prima	Poder Calorífico (J/g)		Producción (t/año)	Porcentaje	Residuo		Producción (t/año)	Porcentaje	Residuo
<i>Cáscara de papa</i>	41994,2	papa	421000	2% cáscara	8420	maíz	1358626	18% tusa	244552,7
<i>Tusa de maíz</i>									

Realizado por: Samaniego W., 2023

La cantidad de residuos generados por cada una de las materias primas de la biomasa, lo hacen óptimos y factibles para la producción de briquetas en una escala industrial y su posterior aplicación.

4.2 Análisis Elemental

Los resultados del análisis elemental realizado a la biomasa de cascara de papa y tusa de maíz se presenta a continuación.

Tabla 4-2: Resultados del Análisis Elemental

Muestra	Resultados			Unidad
	Carbono	Nitrógeno	Hidrógeno	
Cáscara de papa y tusa de maíz	50,39	0,15	6,13	%

Realizado por: Samaniego W., 2023

Existe un porcentaje importante de carbono, lo que beneficiaría al proceso de combustión y gasificación, en cuanto al nitrógeno el porcentaje es bajo lo que indicaría que la cantidad de gases contaminantes emitidos por la biomasa en procesos termoquímicos son mínimos.

4.3 Análisis Inmediato

4.3.1 Humedad

$$\% \text{ Humedad} = \frac{Ph - Ps}{Ph} * 100 \quad (1)$$

Dónde:

Ph: peso de muestra húmeda

Ps: peso de muestra seca

4.3.2 Compuesto Volátiles

$$\% \text{ Volátiles} = \%Pp - \% \text{ Humedad} \quad (2)$$

$$\%Pp = \frac{Pm - Pi}{Pm} * 100 \quad (3)$$

Dónde:

Pp: pérdida de peso

Pm: peso de la muestra

Pi: peso de la muestra después del calentamiento

4.3.3 Ceniza

$$\% C = \frac{\text{peso final}}{\text{peso inicial}} \quad (4)$$

4.3.4 Carbono Fijo

$$\% \text{Carbono Fijo} = 100 - \% \text{Humedad} + \% C + \% \text{Volátiles} \quad (5)$$

Mediante el uso de las ecuaciones de (1) hasta las (5), se obtuvieron los resultados del análisis inmediato de la biomasa, datos que son presentados en la tabla 4-3.

Tabla 4-3: Resultados Análisis Inmediato

Muestra	<i>Humedad</i>	<i>Volátiles</i>	<i>Carb. Fijo</i>	Cenizas	Unidad
Cáscara de papa y tusa de maíz	7,67	73,97	-	18,36	%

Realizado por: Samaniego W., 2023

Dentro de los resultados se obtuvo un importante porcentaje de compuestos volátiles, indicativo de que existe reactividad y facilidad de ignición de la muestra.

4.4 Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico realizado a las briquetas (biomasa) de cáscara de papa y tusa de maíz permite obtener los porcentajes característicos del perfil de degradación de la biomasa.

Los datos generados por el software del equipo de análisis termogravimétrico fueron transportados hacia Excel del paquete de Microsoft Office 360, siendo éste el software utilizado para el análisis, cálculo de datos y generación de gráficos.

Las siguientes ilustraciones son las curvas TG y DTG generadas por la descomposición térmica de la biomasa analizada.

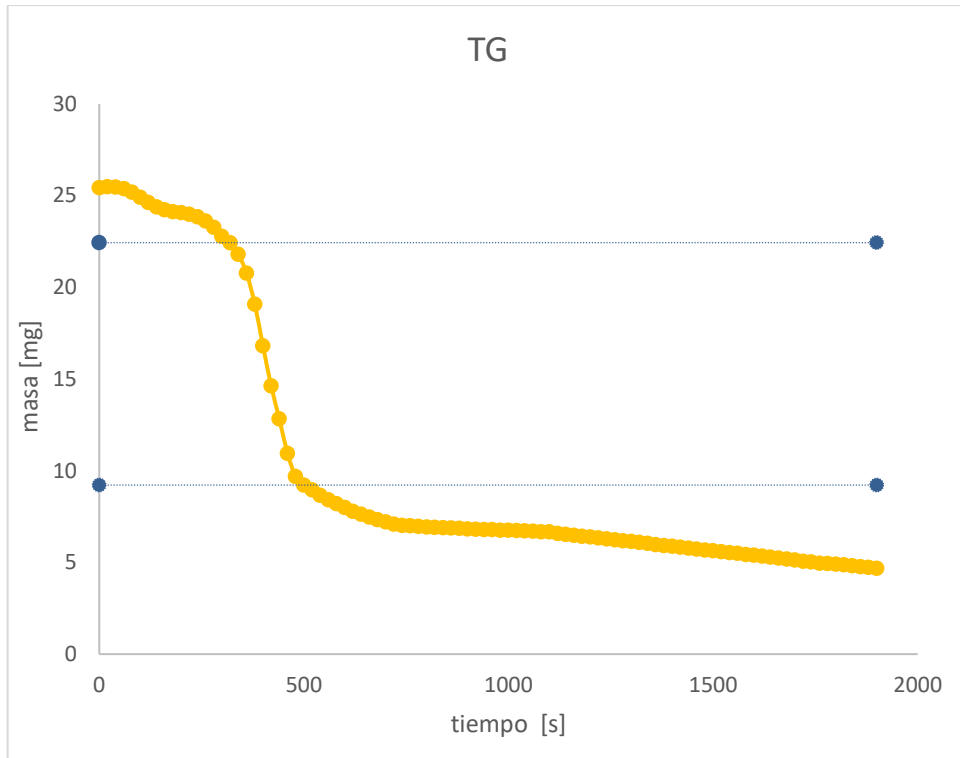


Ilustración 4-1: TG en función del tiempo, 20 °C/min, 1mm.

Realizado por: Samaniego W., 2023

La ilustración 4-1 muestra la gráfica TG que representa la pérdida de masa en función del tiempo de la biomasa CPTM a velocidad de calentamiento de 20 °C/min y 1mm.

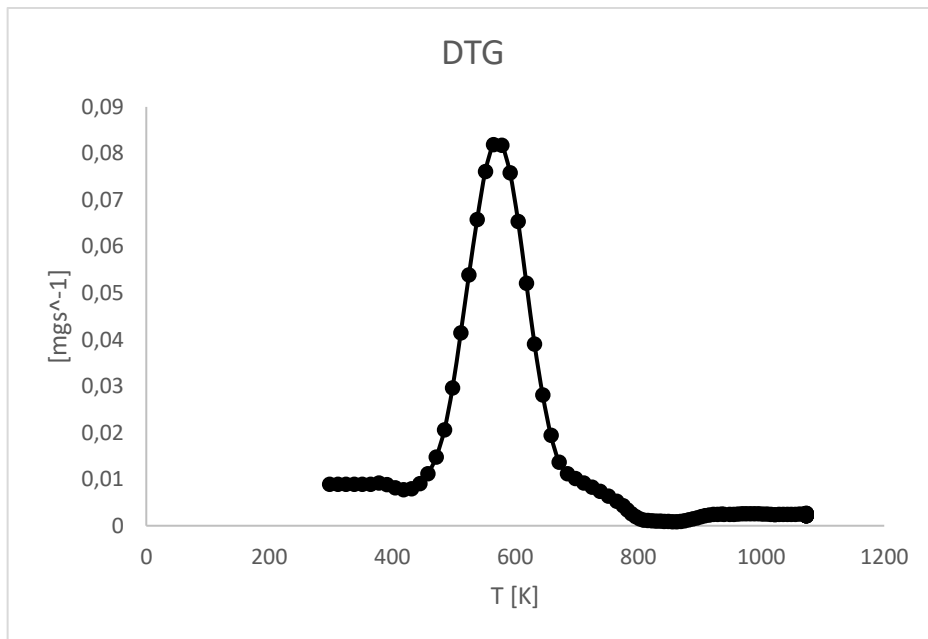


Ilustración 4-2: DTG en función de la temperatura, 20 °C/min, 1mm.

Realizado por: Samaniego W., 2023

La ilustración 4-2 muestra la curva DTG que presenta un comportamiento, donde la eliminación de la humedad está dentro del intervalo de 25 a 100 °C o 298 a 373 K; el pico de mayor descomposición del material lignocelulósico se encuentra en el rango de temperatura de 200 a 350 °C o 473 a 623 K, esto representa la descomposición del material volátil (hemicelulosa y celulosa).

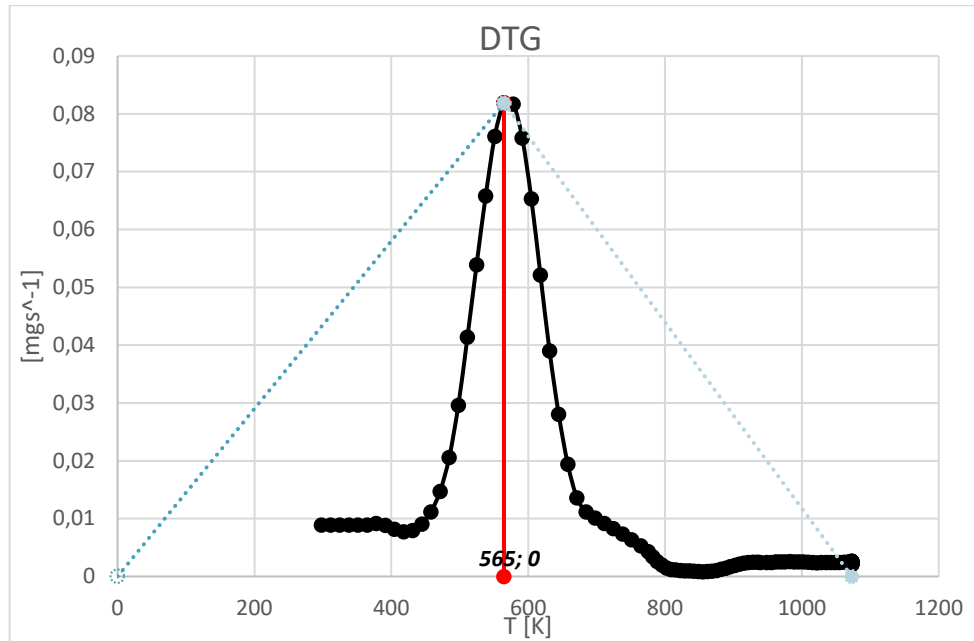


Ilustración 4-3: Identificación de temperatura de referencia en DTG
Realizado por: Samaniego W., 2023

4.4.1 Generación de datos para el modelado cinético

Los modelos cinéticos se obtienen utilizando el promedio de pérdida de masa en función del tiempo de la biomasa analizada, conocida con el nombre de conversión.

La conversión está definida con la función:

$$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_f} \quad (6)$$

Dónde:

α : conversión

m: masa en el tiempo (mg)

m_0 : masa inicial (mg)

m_f : masa final (mg)

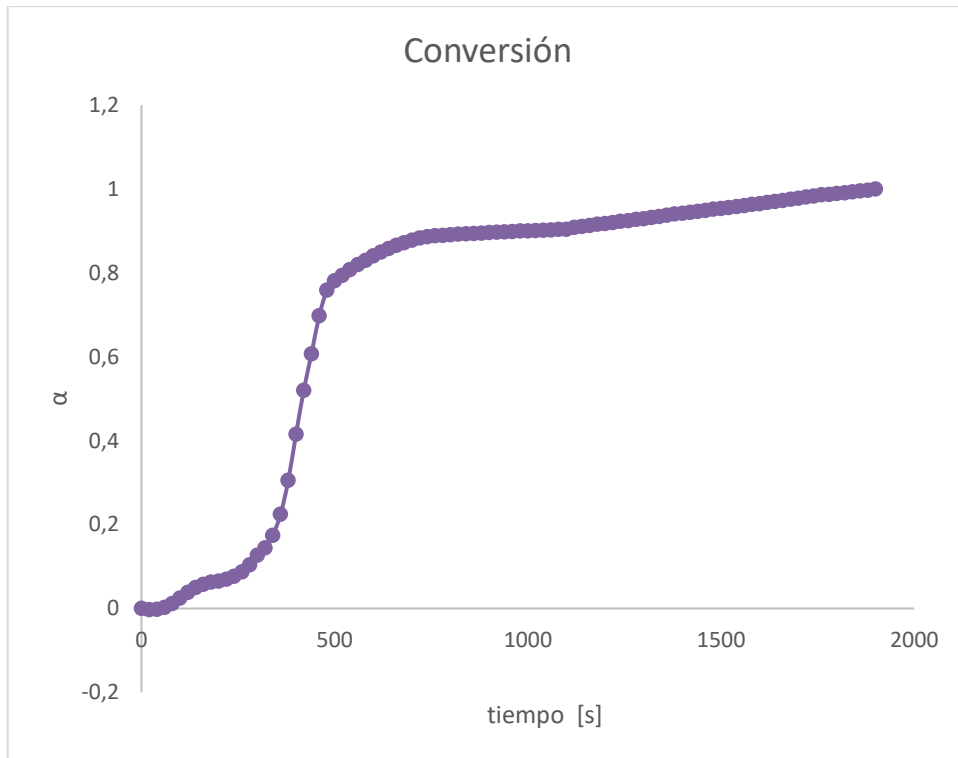


Ilustración 4-4: Conversión en función del tiempo, 20 °C/min, 1mm.

Realizado por: Samaniego W., 2023

En la Ilustración 4-4 se observa la conversión de la biomasa CPTM analizada a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min y 1mm.

4.5 Modelado cinético

En general la principal reacción de la descomposición de la biomasa se expresa como:



Ya que existen diferentes mecanismos de reacción para la degradación térmica de los principales componentes de la biomasa, se pueden formar múltiples productos a partir de la degradación térmica de cada uno (García, 1993, pp.25-31).

El modelado cinético se obtiene usando los datos TG para encontrar en términos matemáticos la Energía de Activación y Factor pre exponencial, para esto se ha tomado en cuenta dos modelos diferentes que se detallan a continuación.

4.5.1 Modelo 1

En el presente trabajo con los datos obtenidos a una velocidad de calentamiento de 20 °C/min, se realizó un análisis no isoconversional (Encalada y Jácome, 2018, p.40).

La velocidad de calentamiento es función del tiempo la cual tiene la siguiente expresión:

$$T = \beta t + T_0 \quad (8)$$

$$dT = \beta dt \quad (9)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (10)$$

$$\frac{d\alpha}{f(\alpha)} = k(T)dt \quad (11)$$

Combinando la ecuación 8 con 11, se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{k(T)dt}{\beta} \quad (12)$$

La constante de velocidad k(T) sigue la ecuación de Arrhenius

$$k(T) = A e^{\frac{-E}{RT}} \quad (13)$$

Donde:

E: energía de activación (kJ/mol)

A: factor pre exponencial (1/min)

T: temperatura (K)

R: 0.008314 (kJ/mol K)

La función $f(\alpha)$ depende del orden de la reacción n.

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (14)$$

Reemplazando la ecuación 14 y 13 en 12, tenemos:

$$\frac{d\alpha}{(1 - \alpha)} = \frac{A e^{\frac{-E}{RT}}}{\beta} dT \quad (15)$$

Se utilizó el modelo integral de primer orden, donde se integra ambos términos de la ecuación, considerando que $E / (RT) \gg 1$.

$$\ln[\ln -(1 - \alpha)] = \left(\frac{A}{\beta}\right) \left(\frac{RT^2}{E}\right) e^{\frac{-E}{RT}} \quad (16)$$

Aplicando logaritmo neperiano

$$\ln[\ln-(1-\alpha)] = \ln\left(\frac{ART^2}{\beta E}\right) - \frac{E}{RT} \quad (17)$$

Para obtener los parámetros cinéticos de energía de activación y factor pre exponencial se grafica la pendiente y la ordenada al origen de la curva $\ln[-(1-\alpha)]$ frente a $1/T$.

Como se muestra a continuación el cálculo Modelo 1 para CPTM 1mm; β : 20 °C/min.

Regresión (Ver gráfica Anexo D)

$$\ln[-\ln(1-\alpha)] = -2914,30 (1/T) + 4,22 \quad (18)$$

Donde:

Pendiente: -2914,30

Ordenada al origen: 4,22

Siguiendo la ecuación 17, tenemos:

$$-\frac{E}{R} = -2914,30 \quad (19)$$

Donde al despejar E, obtenemos el valor correspondiente a la energía de activación:

$$E = 2914,30 R \quad (20)$$

$$E = 24,229 \text{ kJ/mol}$$

Ahora igualamos el valor de la ordenada al origen:

$$\ln\left(\frac{RA}{\beta E}\right) = 4,22 \quad (21)$$

$$\left(\frac{RAT^2}{\beta E}\right) = e^{4,22}$$

$$A = 0,207 \text{ s}^{-1}$$

En el Anexo D se muestra el resultado de la regresión lineal resultante del Modelo Cinético 1 para CPTM, de las cuales se obtienen los valores del factor pre exponencial y energía de activación para el tamaño de partícula específico y velocidad de calentamiento aplicados en el presente trabajo, los mismos que se encuentran tabulados en la tabla 4-4.

Tabla 4-4: Parámetros cinéticos de gasificación, modelo 1

Tp (mm)	β (°C/min)	Regresión Lineal	R^2	E(kJ/mol)	A (s ⁻¹)
1	20	$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = -2914,30 (1/T) + 4,22$	0,945	24,229	0,207

Realizado por: Samaniego W., 2023

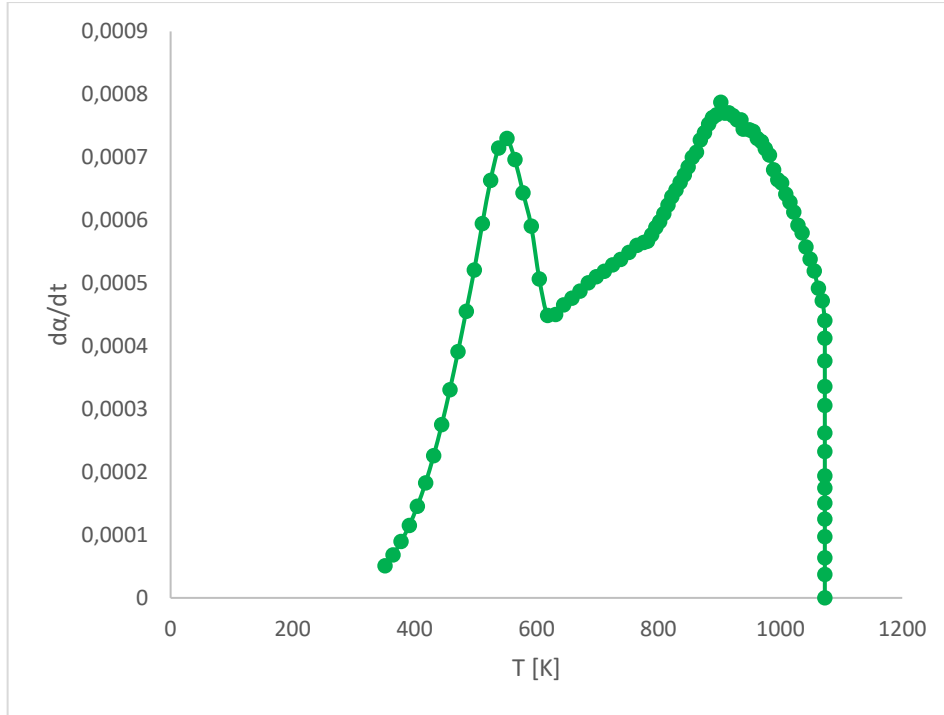


Ilustración 4-5: Resultado Modelo 1: $d\alpha/dt$ en función de la temperatura, 20 °C/min, 1mm.

Realizado por: Samaniego W., 2023

En la ilustración 4-5 representa la curva DTG correspondiente a la biomasa CPTM, con parámetros cinéticos y ecuaciones calculados para el Modelo 1.

En la tabla 4-5 se describe el modelo cinético para la biomasa analizada, este modelo fue obtenido mediante los parámetros cinéticos tabulados en la tabla 4-3, las cuales siguen una cinética de primer orden.

Tabla 4-5: Ecuación modelo cinético 1

Tp (mm)	β (°C/min)	CPTM
1	20	$\frac{d\alpha}{dt} = 0,207 e^{\frac{-2914,30}{T}} (1 - \alpha)$

Realizado por: Samaniego W., 2023

4.5.2 Modelo 2

El modelo de Coasts Redfern (Álvarez et al., 2016, pp.1-20) corresponde a una ecuación empírica de modelos no isoconversionales, permitiendo calcular la energía de activación y el factor pre exponencial.

La cinética de este modelo está definida por las siguientes ecuaciones:

$$T = \beta t + T_0 \quad (22)$$

$$dT = \beta dt \quad (23)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(T)f(\alpha) \quad (24)$$

$$\frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{k(T)dt}{\beta} \quad (25)$$

Combinando la ecuación 23 y 25 se expresa de la siguiente manera

$$\frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{k(T)dt}{\beta} \quad (26)$$

La constante de velocidad $k(T)$ sigue la ecuación de Arrhenius

$$k(T) = A e^{\frac{-E}{RT}}$$

La función $f(\alpha)$ depende del orden de la reacción n

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (27)$$

Reemplazando la ecuación 14 y 13 en 12, tenemos:

$$\frac{d\alpha}{(1 - \alpha)} = \frac{A e^{\frac{-E}{RT}}}{\beta} dT \quad (28)$$

Definimos una función integral $g(\alpha)$

$$g(\alpha) = \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{k(T)dT}{\beta} \quad (29)$$

$$g(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \int_{T_0}^T \frac{A}{\beta} e^{\frac{-E}{RT}} dT \quad (30)$$

$$g(\alpha) = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T e^{\frac{-E}{RT}} dT \quad (31)$$

Aplicando cambio de variable

$$x = \frac{E}{RT} \quad (32)$$

$$dx = \frac{E}{R} \left(-\frac{1}{x^2} \right) dT \quad (33)$$

$$g(\alpha) = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T \frac{E}{R} e^{-x} \left(-\frac{1}{x^2} \right) dx \quad (34)$$

$$g(\alpha) = \frac{AE}{\beta R} \int_{T_0}^T e^{-x} \left(-\frac{1}{x^2} \right) dx \quad (35)$$

Donde:

$$P(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-x}}{x^2} dx \quad (36)$$

Reemplazando

$$g(\alpha) = \frac{AE}{\beta R} P(x) \quad (37)$$

La integral $P(x)$ no se puede evaluar analíticamente, aunque, la forma que posee ha permitido cientos de aproximaciones de su expresión. Este modelo se obtiene mediante la integración de la ecuación 35, y aproximando la integral de temperatura (la cual no tiene solución exacta) (Encalada y Jácome, 2018, p.48).

La solución para $P(x)$ propuesta por Coasts Redfern es:

$$P(x) = \left(1 - \frac{2}{x} \right) e^{-\frac{x}{x^2}} \quad (38)$$

Al reemplazar la ecuación 38 en ecuación 37, tenemos:

$$g(\alpha) = \frac{AE}{\beta R} \left(1 - \frac{2}{x} \right) e^{-\frac{x}{x^2}} \quad (39)$$

Reemplazando x

$$g(\alpha) = \frac{AE}{\beta R} \left(1 - \frac{2}{\frac{E}{RT}} \right) e^{-\frac{\frac{E}{RT}}{\left(\frac{E}{RT}\right)^2}} \quad (40)$$

$$g(\alpha) = \frac{AE}{\beta R} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right) e^{-\frac{RT}{E}} \quad (41)$$

Aplicando logaritmos llegamos a la siguiente ecuación

$$\ln \left[\frac{g(\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left[\frac{AE}{\beta R} \left(1 - \frac{2RT}{E}\right) \right] - \frac{RT}{E} \quad (42)$$

Para obtener los parámetros cinéticos de energía de activación y factor pre exponencial se grafica $\ln \left[\frac{g(\alpha)}{T^2} \right]$ con respecto a $1/T$ se obtiene E y A de la pendiente y la ordenada al origen.

Los modelos que siguen la función $g(\alpha)$ para diferentes órdenes de reacción se detalla en la tabla 4-6, mediante estas ecuaciones se obtienen diferentes valores para los parámetros cinéticos calculados.

Tabla 4-6: Modelos de reacción para la descomposición de biomasa

n	$g(\alpha)$	$f(\alpha)$
1	$-\ln(1 - \alpha)$	$1 - \alpha$
1,5	$2[(1 - \alpha)^{-0,5} - 1]$	$(1 - \alpha)^{1,5}$
2	$(1 - \alpha)^{-1} - 1$	$(1 - \alpha)^2$

Realizado por: Samaniego W., 2023

Como se muestra a continuación el cálculo Modelo 2 para CPTM 1mm; β : 20 °C/min.
Regresión (Ver gráfica Anexo D)

$$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = -1668,005 (1/T) - 10,786 \quad (43)$$

Donde:

Pendiente: -1668,005

Ordenada al origen: -10,786

Siguiendo la ecuación 17, tenemos:

$$-\frac{E}{R} = -1668,005 \quad (44)$$

Donde al despejar E, obtenemos el valor correspondiente a la energía de activación:

$$E = 1668,005 R$$

$$E = 13,867 \text{ kJ/mol}$$

Ahora igualamos el valor de la ordenada al origen:

$$\ln \left[\frac{AE}{\beta R} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] = -10,786 \quad (45)$$

$$\frac{AE}{\beta R} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) = e^{-10,786} \quad (46)$$

$$A = 0,0355 \text{ s}^{-1}$$

En el Anexo D se muestra el resultado de la regresión lineal resultante del Modelo Cinético 2 para CPTM, en las cuales se obtienen los valores del factor pre exponencial y energía de activación para el tamaño de partícula específico y velocidad de calentamiento aplicados en el presente trabajo, los mismos que se encuentran tabulados en la tabla 4-7.

Tabla 4-7: Parámetros cinéticos de gasificación, modelo 2

Tp (mm)	β (°C/min)	Regresión Lineal	R^2	E(kJ/mol)	A (s^{-1})
1	20	$\ln[-\ln(1 - \alpha)] = -1668,005 (1/T) - 10,786$	0,798	13,867	0,0355

Realizado por: Samaniego W., 2023

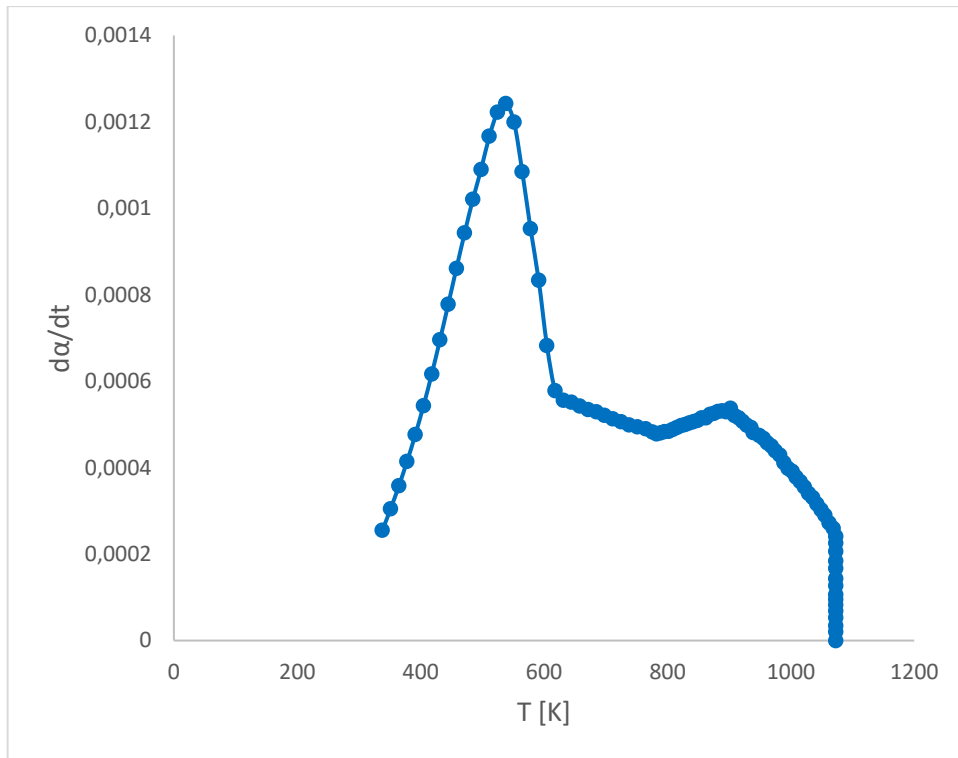


Ilustración 4-6: Resultado Modelo 2: $d\alpha/dt$ en función de la temperatura, 20 °C/min, 1mm.

Realizado por: Samaniego W., 2023

La ilustración 4-6 representa la curva DTG correspondiente a la biomasa CPTM, con parámetros cinéticos y ecuaciones calculados para el Modelo 2.

En la tabla 4-8 se describe el modelo cinético para la biomasa analizada, este modelo fue obtenido mediante los parámetros cinéticos tabulados en la tabla 4-6, las cuales siguen una cinética de primer orden.

Tabla 4-8: Ecuación modelo cinético 2

T_p (mm)	β (°C/min)	CPTM
1	20	$\frac{d\alpha}{dt} = 0,0355 e^{\frac{-1668,005}{T}}(1 - \alpha)$

Realizado por: Samaniego W., 2023

4.6 Modelo planteado

Con la finalidad de minimizar el error de las curvas $d\alpha/dt$ calculada y experimental se ajustó los parámetros cinéticos E y A, obteniendo un nuevo modelo que se asemeja de mejor manera a la cinética de gasificación de la biomasa analizada.

Se utilizó la herramienta software de cálculo Excel teniendo en cuenta algunas restricciones, como la minimización del FOE, el valor de DTG correspondiente al pico más alto de temperatura para la curva experimental.

La expresión obtenida para el proceso de pirólisis, combustión y gasificación de biomasa específica es la siguiente:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A e^{-\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T}\right)} (1 - \alpha)^n \quad (47)$$

En las siguientes tablas de resultados se propone el nuevo modelo cinético aplicando la nueva expresión

Tabla 4-9: Parámetros cinéticos y ecuación ajustados, modelo 1

n	E(kJ/mol)	A (s ⁻¹)	CPTM
1	10,076	0,494	$\frac{d\alpha}{dt} = 0,494 e^{-\frac{10,076}{R}\left(\frac{1}{T}\right)} (1 - \alpha)$

Realizado por: Samaniego W., 2023

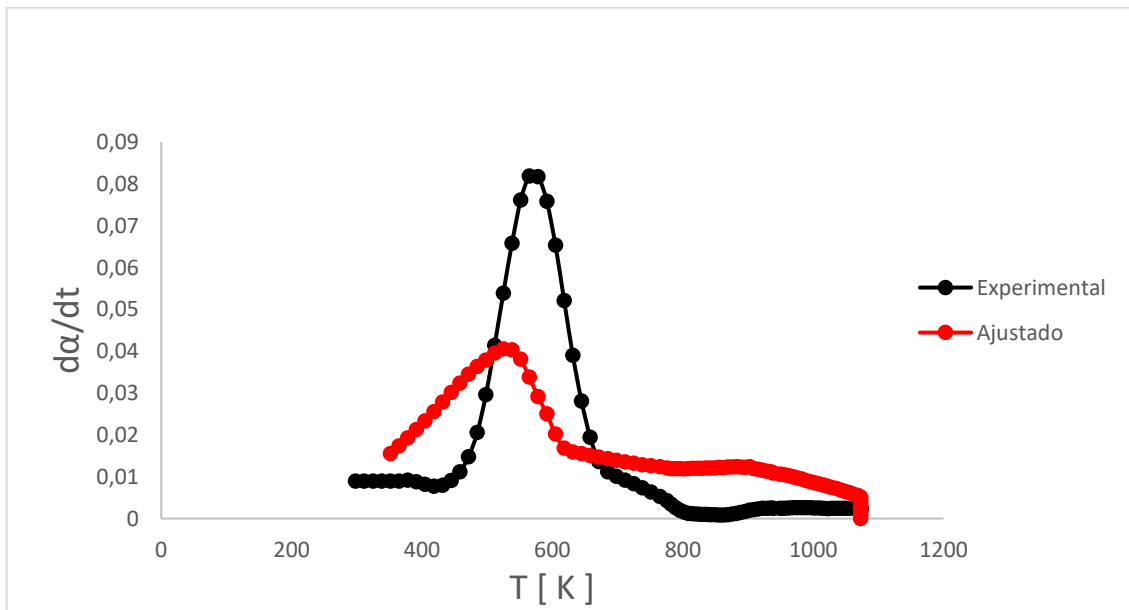


Ilustración 4-7: Resultado Modelo Ajustado I y Experimental, 20 °C/min, 1mm.

Realizado por: Samaniego W., 2023

La ilustración 4-7 representa las curvas DTG de los resultados de modelo ajustado I y los datos experimentales de la biomasa CPTM a 20 °C/min y 1mm.

Tabla 4-10: Parámetros cinéticos y ecuación ajustados, modelo 2

n	E(kJ/mol)	A (s ⁻¹)	CPTM
1	10,125	0,498	$\frac{d\alpha}{dt} = 0,498 e^{-\frac{10,125}{R}\left(\frac{1}{T}\right)}(1 - \alpha)$

Realizado por: Samaniego W., 2023

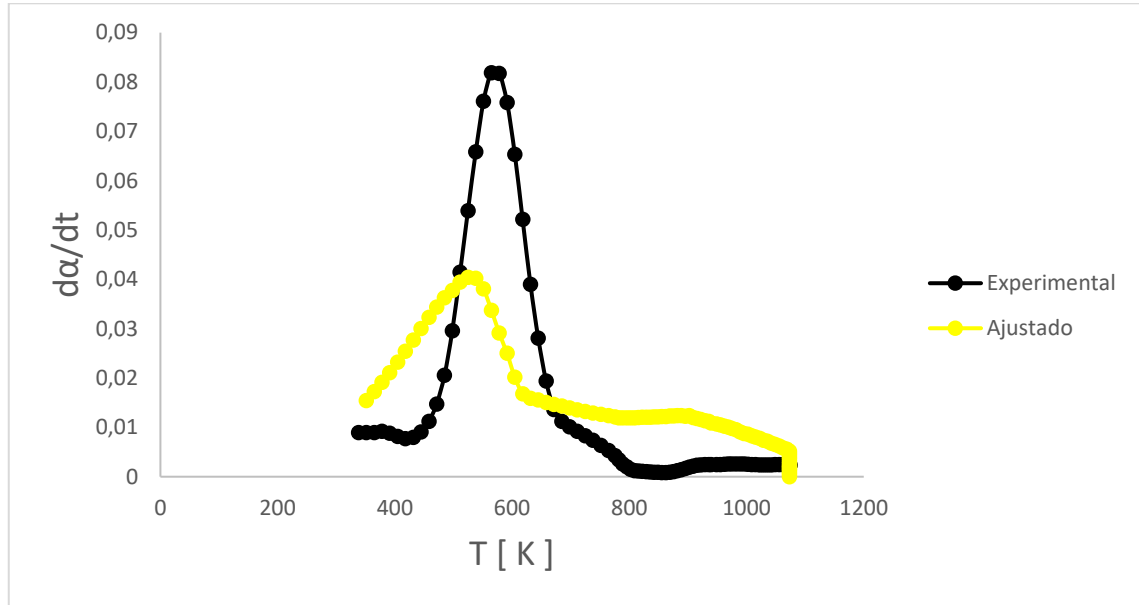


Ilustración 4-8: Resultado Modelo Ajustado II y Experimental, 20 °C/min, 1mm.

Realizado por: Samaniego W., 2023

La ilustración 4-8 representa las curvas DTG de los resultados de modelo ajustado II y los datos experimentales de la biomasa CPTM a 20 °C/min y 1mm.

Tabla 4-11: Parámetros cinéticos y ecuación ajustados, picos mayoritarios, modelo 1

n	E(kJ/mol)	A (s ⁻¹)	CPTM
1	73,914	1021445,68	$\frac{d\alpha}{dt} = 1021445,68 e^{-\frac{73,914}{R}\left(\frac{1}{T}\right)}(1 - \alpha)$

Realizado por: Samaniego W., 2023

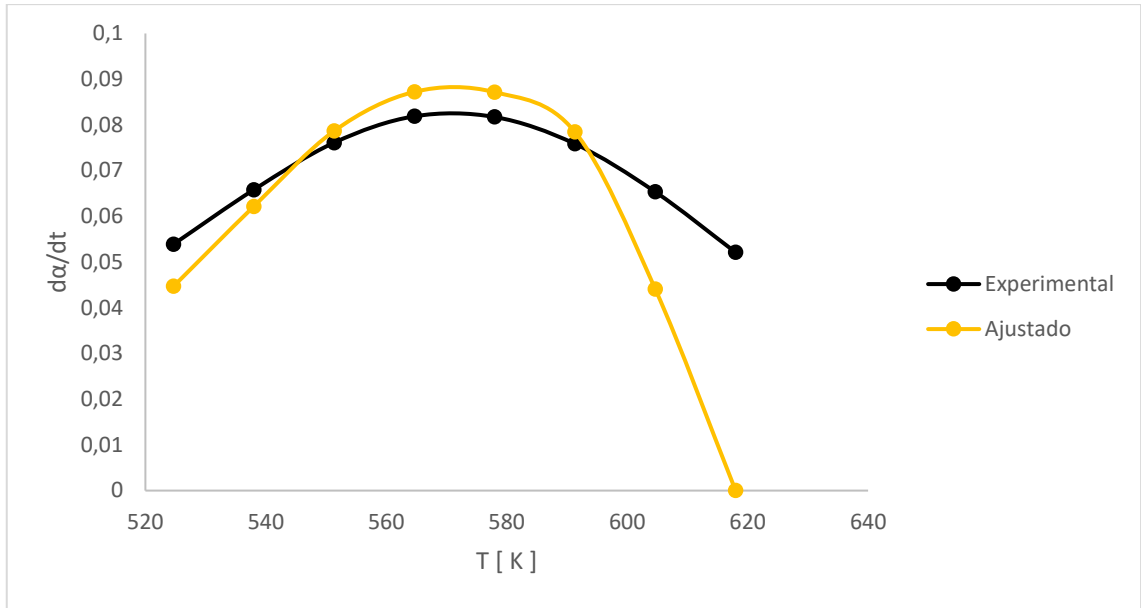


Ilustración 4-9: Resultado Modelo Ajustado I y Experimental, picos mayoritarios, 20 °C/min, 1mm.

Realizado por: Samaniego W., 2023

La ilustración 4-9 representa las curvas DTG de los resultados de modelo ajustado I y los datos experimentales de la biomasa CPTM a 20 °C/min y 1mm, solamente de los picos mayoritarios.

Tabla 4-12: Parámetros cinéticos y ecuación ajustados, picos mayoritarios, modelo 2

n	E(kJ/mol)	A (s ⁻¹)	CPTM
1	102,523	421556149,4	$\frac{d\alpha}{dt} = 421556149,4 e^{\frac{-102,523}{R}(\frac{1}{T})}(1 - \alpha)$

Realizado por: Samaniego W., 2023

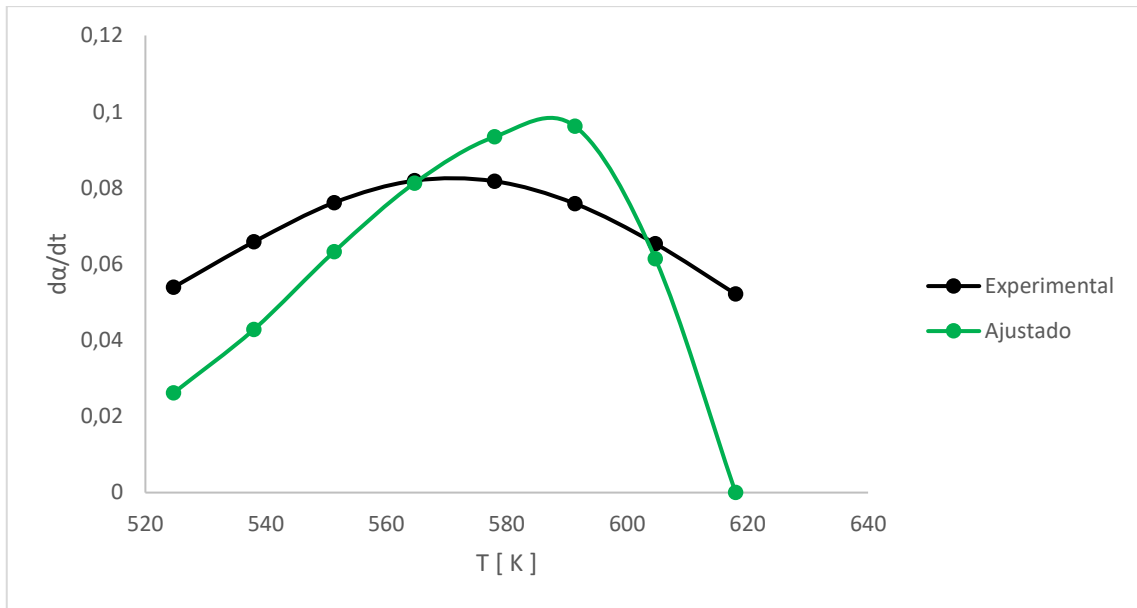


Ilustración 4-10: Resultado Modelo Ajustado II y Experimental, picos mayoritarios, 20 °C/min, 1mm.

Realizado por: Samaniego W., 2023

La ilustración 4-10 representa las curvas DTG de los resultados de modelo ajustado II y los datos experimentales de la biomasa CPTM a 20 °C/min y 1mm, solamente de los picos mayoritarios.

Los resultados establecidos utilizando los datos experimentales en todo el tiempo del análisis, en comparación con los datos únicamente de los picos más altos, presentan una mejor tendencia al ajustar las curvas experimentales y calculadas.

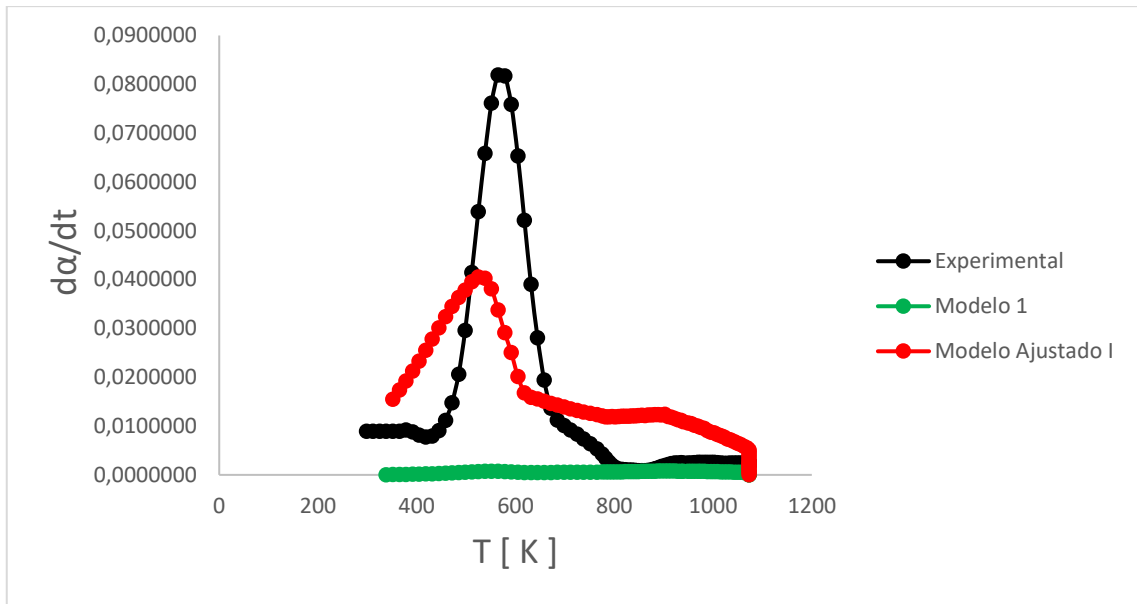


Ilustración 4-11: $d\alpha/dt$ (vs) temperatura, Experimental, Modelo 1 y Modelo Ajustado I
 Realizado por: Samaniego W., 2023

La ilustración 4-11 representa el resumen de las curvas DTG de los resultados de modelo ajustado I, los datos experimentales y modelo 1 (sin ajustar) de la biomasa CPTM a 20 °C/min y 1mm.

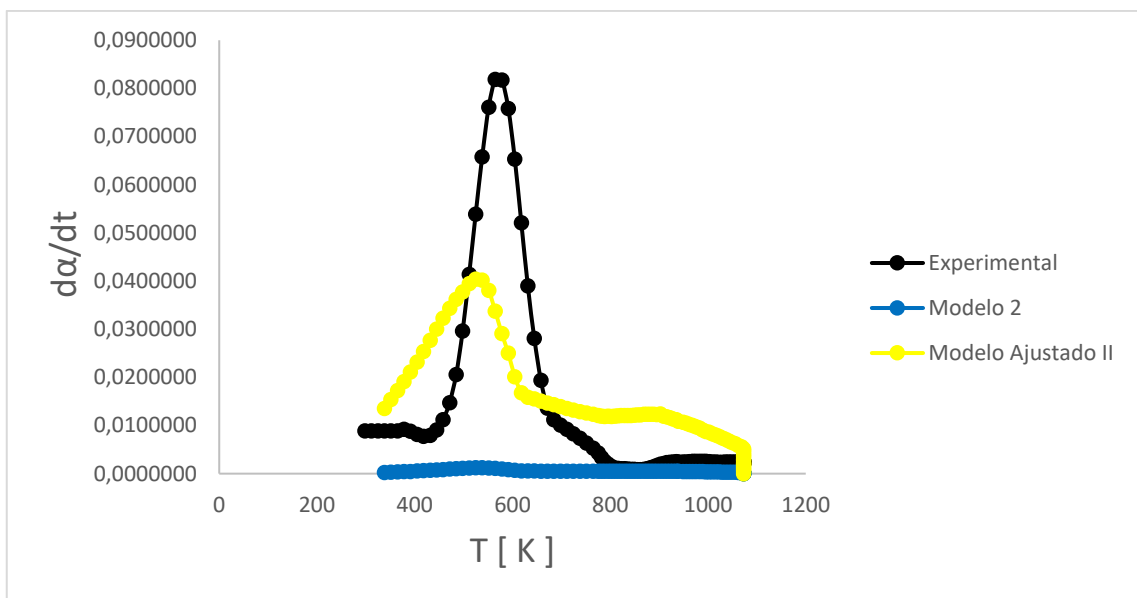


Ilustración 4-12: $d\alpha/dt$ (vs) temperatura, Experimental, Modelo 2 y Modelo Ajustado II

Realizado por: Samaniego W., 2023

La ilustración 4-12 representa el resumen de las curvas DTG de los resultados de modelo ajustado II, los datos experimentales y modelo 2 (sin ajustar) de la biomasa CPTM a 20 °C/min y 1mm.

4.7 Validación estadística

La validación estadística se realizó con datos obtenidos tanto de manera teórica, como con datos experimentales y datos ajustados, por medio de parámetros que se definen a continuación.

4.7.1 Prueba F de Fisher

Las varianzas se pueden comparar mediante esta prueba estadística, en la que el valor F generado se coteja con un valor F crítico, este último posibilita identificar si los datos utilizados están dentro de la gráfica del estadístico F especificada por los grados de libertad.

Bajo el cumplimiento condición de $F_{crítico} > F$, la hipótesis de que la desviación estándar y las medias son iguales es verdadera, de lo contrario con la condición descrita, la hipótesis es falsa (Arriaza, 2006, pp.49-51).

La prueba estadística se realizó en el programa Excel del paquete de Microsoft Office 360.

4.7.2 Función Objetivo Error (FOE)

La Función Objetivo Error es un parámetro que mediante la minimización del error total de los datos permite la optimización de parámetros calculado para cada modelo cinético, mientras más se acerque a cero mejor ajuste tendrán los resultados experimentales con los teóricos. La Función Objetivo se define como la diferencia entre el DTG experimental y calculada por el modelo (Encalada y Jácome, 2018, p.75).

Tabla 4-13: Resultado del análisis estadístico para modelo 1

MODELO 1		
Prueba F para varianzas de dos muestras		
	<i>Modelo Inicial</i>	<i>Modelo Ajustado</i>
FOE	0,00049198	0,00022046
Varianza	2,0222E-06	2,7195E-07
Observaciones	93	93
Grados de libertad	92	92

F	7,43620739
P(F<=f) una cola	2,0113E-19
Valor crítico para F (una cola)	1,4116435

Realizado por: Samaniego W., 2023

Tabla 4-14: Resultado del análisis estadístico para modelo 2

MODELO 2		
Prueba F para varianzas de dos muestras		
	<i>Modelo Inicial</i>	<i>Modelo Ajustado</i>
FOE	0,00047332	0,00021367
Varianza	1,9256E-06	2,6533E-07
Observaciones	96	96
Grados de libertad	95	95
F	7,2574263	
P(F<=f) una cola	1,2968E-19	
Valor crítico para F (una cola)	1,40384092	

Realizado por: Samaniego W., 2023

En las tablas 4-13 y 4-14 se detallan los resultados de los parámetros estadísticos obtenidos, tanto para el modelo 1 y 2 con sus respectivos ajustes mediante el modelo propuesto. Evidenciando que existe una mejora significativa en comparación con los modelos iniciales, se usó la Prueba F de Fisher en el que se utilizó un parámetro alfa de 0,05.

El modelo propuesto permitió una disminución importante de los valores de varianza desde 10^{-6} a 10^{-7} que de acuerdo con Kerlinger & Lee (2002, pp.93-103) indicativo de que es mínima la dispersión entre los datos experimentales y calculados, le media también se redujo.

Tabla 4-15: Comparación del modelo propuesto con resultados cinéticos reportados para diferentes biomásas.

Autor	Biomasa	n	E(kJ/mol)	A (s ⁻¹)	Ecuación Cinética
Samaniego, Palmay y Parada	CPTM	1	10,076	0,494	$\frac{d\alpha}{dt} = 0,494 e^{-\frac{10,076}{R}\left(\frac{1}{T}\right)}(1 - \alpha)$
Samaniego, Palmay y Parada	CPTM	1	10,125	0,498	$\frac{d\alpha}{dt} = 0,498 e^{-\frac{10,125}{R}\left(\frac{1}{T}\right)}(1 - \alpha)$
De la Rosa, Encalada y Jácome (2018)	CV	1	22,35	6,04	$\frac{d\alpha}{dt} = 6,04 e^{-\frac{22,35}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{571,97}\right)}(1 - \alpha)$
De la Rosa, Encalada y Jácome (2018)	ccFA	1	16,47	4,33	$\frac{d\alpha}{dt} = 4,33 e^{-\frac{16,47}{R}\left(\frac{1}{T}\right)}(1 - \alpha)$
De la Rosa, Encalada y Jácome (2018)	ccV	1	20,89	10,41	$\frac{d\alpha}{dt} = 10,41 e^{-\frac{20,89}{R}\left(\frac{1}{T}\right)}(1 - \alpha)$
Wilson et al. (2011)	Cáscara de café	1	370,8	330	$\frac{d\alpha}{dt} = 330 e^{-\frac{370,8}{R}\left(\frac{1}{T}\right)}(1 - \alpha)$
Regalado Marín y Montero (2017)	Tallos de rosas	2	29,97	0,021	$\frac{d\alpha}{dt} = 0,021 e^{-\frac{29,97}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{564}\right)}(1 - \alpha)^2$

Realizado por: Samaniego W., 2023

DISCUSIÓN

TGA

La curva termogravimétrica TG y su derivada DTG, representan los datos experimentales de gasificación, donde la mayor pérdida de masa por efecto térmico está comprendida entre 200 a 350 °C o 473 a 623 K, en este intervalo de temperatura, la biomasa sufre una importante descomposición del material lignocelulósico.

El pico principal de mayor pérdida de masa se da a los 292 °C o 565 K un valor promedio en concordancia con Regalado y Marín (2017, p.58) en su determinación de parámetros cinéticos en la combustión de raquis de banano y tallos de rosas detalla que el pico principal se ubica en 277 °C para raquis de banano y 318 °C para tallo de rosas.

MODELADO

Con la energía de activación y el factor pre exponencial se obtuvieron dos modelos, pero con el propósito de conseguir resultados que se asemejen a los datos experimentales se realizó el ajuste de los parámetros cinéticos E y A, con un modelo nuevo el cual se apega mejor a la cinética de gasificación de la biomasa, comparado con trabajos anteriores para diferentes biomasa, Tabla 4-15, se aprecia que mediante el ajuste, los parámetros cinéticos obtenidos son similares al de cascarilla de cacao fino de aroma (ccFA) de (Encalada y Jácome 2018).

Algunos autores consideran solo una parte de los datos, generalmente los picos mayoritarios para estos modelos. Lo que ha conllevado un análisis matemático y aplicar conocimiento de modelado, para obtener un modelo que permite representar la curva con todos los datos del intervalo de tiempo y temperatura.

CONCLUSIONES

- Se determinó la cinética química del proceso de gasificación de briquetas provenientes de cáscara de papa y tusa de maíz mediante análisis termogravimétrico, con dos modelos diferentes. La ecuación cinética del modelo 1 fue $da/dt=0,494 e^{-\frac{10,076}{R}\left(\frac{1}{T}\right)}(1-\alpha)$, y del modelo 2 $da/dt=0,498 e^{-\frac{10,125}{R}\left(\frac{1}{T}\right)}(1-\alpha)$.
- Se determinó que es factible el uso de briquetas de biomasa provenientes de cáscara de papa y tusa de maíz, ya que existe una producción promedio de estos residuos de 8420 y 244552 toneladas por año de cáscara de papa y tusa de maíz respectivamente en el país y su aplicación es a escala industrial.
- Se realizó el análisis termogravimétrico de la muestra de briquetas de cáscara de papa y tusa de maíz en condiciones gasificación específicas, tamaño de partícula de 1 mm, una velocidad de calentamiento de 20 °C/min, temperatura inicial de 25 °C y máxima de 800 °C; obteniéndose datos característicos del perfil de degradación, curvas TG y DTG.
- Se determinó la energía de activación (E) y factor pre exponencial (A) del proceso en dos modelos diferentes; para el modelo 1 la energía de activación fue de 10,076 kJ/mol y el factor pre exponencial de $0,494s^{-1}$ y el modelo 2 tuvo una energía de activación es de 10,125 kJ/mol y el factor pre exponencial de $0,498s^{-1}$.
- Se identificó mediante validación estadística con Función Objetivo Error (FOE) y Prueba F de Fisher el margen de error entre los datos experimentales del análisis termogravimétrico y los datos del modelo cinético 1 y modelo cinético 2 fue de 0,0002204 y 0,0002136 respectivamente, concluyendo que los datos generados por los dos modelos se apegan muy cercanamente a los datos experimentales.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda ampliar la investigación con el fin de fabricar briquetas de biomasa como combustible sólido en una escala industrial, ya que la cáscara de papa y tusa de maíz con las cuales está conformada la biomasa analizada son residuos generados en gran cantidad en nuestro país.
- Trabajar con diferentes tamaños de partícula de la biomasa, realizar ensayos de termogravimetría y utilizar diferentes velocidades de calentamiento para analizar si estas dos variables, permiten obtener un mejor ajuste de los datos experimentales con los calculados y la relación de la cinética con el tamaño de la partícula en la pirólisis y combustión de biomasa.
- Se recomienda realizar el diseño de un reactor de combustión y gasificación con base en los modelos cinéticos plateados en la investigación.

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ, A.; et al. "Determination of kinetic parameters for biomass combustion". *Bioresource Technology* [en línea], 2016, (España), pp. 1-20. [Consulta: 03 febrero 2023]. ISSN 09608524. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.039>

ARAUJO, A.; et al. *Manual del cultivo de papa para pequeños productores* [en línea]. 3ra Edición. Mejía Ecuador, 2021. [Consulta: 16 abril 2023]. ISBN 978-9942-22-499-6. Disponible en: <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5672>.

ARDILLA, M. *Modelo cinético para el proceso de gasificación de briquetas de carbón en reactor de lecho fijo* [en línea]. (Trabajo de titulación) (Doctorado). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja-Colombia. 2019. pp.25-31 [Consulta: 27 febrero 2023]. Disponible en: https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/handle/001/3688/Modelo_cinetico_proceso_de_gasificacion.pdf?sequence=1.

ARRIAZA, M. *Guía práctica de análisis de datos*. España: Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 2006. [Consulta: 24 junio 2023]. ISBN 8461116615. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/314984329>

BASU, P. Definition of Biomass. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*. 2da ed. Londres-UK, 2018. [Consulta: 19 marzo 2023]. ISBN 978-0-12-396488-5, pp. 50-80. Disponible en: <https://www.iqytechnicalcollege.com/RE502-%20Biomass%20Gasification.pdf>

DE LUCAS, A. ; et al. *Materia Primas. BIOMASA, BIOCOMBUSTIBLES Y SOSTENIBILIDAD*. Madrid-España, 2012. ISBN 978-84-931891-5-0, pp. I4-I30.

ENCALADA, J. & JÁCOME, T. *Determinación de parámetros cinéticos en la devolatilización de biomasa residual de cacao ecuatoriano* [en línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Central del Ecuador. Quito-Ecuador. 2018. pp. 19-75 [Consulta: 25 mayo 2023]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/16660>.

ESIN CONSULTURA S.A. *Atlas Bioenergético del Ecuador* [en línea]. 1ra Edición. Ecuador, 2014. [Consulta: 02 mayo 2023]. Disponible en: <http://www.mediafire.com/file/17dz5lbnwloiea6/ATLAS+BIOENERGETICO+DEL+ECUAD>

OR.zip

FONSECA, E. & TIERRA, L. *Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz y pruebas de producción de gas pobre* [en línea]. (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2011. pp. 18-22. [Consulta: 28 febrero 2023]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1883>.

GAMBOA, J. *Producción y Aplicación de Biocarbón a partir de Biomasa Residual para Mejorar la Calidad de Suelos Agrícolas* [en línea]. (Trabajo de titulación). Universidad César Vallejo. Lima-Perú. 2021. pp. 6-7. [Consulta: 07 marzo 2023] Disponible en: https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/60501/Gamboa_RJL-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

GARCÉS, R. & MARTÍNEZ, S. *Estudio del poder calorífico del bagazo de caña de azúcar en la industria azucarera de la zona de risaralda* [en línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira-Colombia. 2007. pp. 24-25. [Consulta: 6 julio 2023]. Disponible en: <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/2eb001bf-107f-4e8e-bc95-066339eb26/content>.

GARCÍA, A. *Estudio termoquímico y cinético de la pirólisis de residuos sólidos urbanos* [en línea]. (Trabajo de titulación) (Doctorado). Universidad de Alicante. Alicante-España. 1993. pp. 25-31. [Consulta: 7 junio 2023]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10045/4157>.

INIAP. *Guía de Producción de Maíz de Altura.* [en línea]. Quito-Ecuador, 2012. [Consulta: 17 mayo 2023]. Disponible en: <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/2440/1/iniapscg96.pdf>.

IZQUIERDO, R. *Evaluación del cultivo de maíz (Zea mays) como complemento a la alimentación de bovinos de leche en épocas de escasez de alimento* [en línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Politécnica Salesiana. Cayambe-Ecuador. 2012. pp. 18-23. [Consulta: 4 febrero 2023]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1832/15/UPS-YT00102.pdf>.

KERLINGER, F. & LEE, H. *Investigación del comportamiento.* 4ta Edición. Mexico, 2002, pp. 93-103.

KONGTO, P.; et al. Intensive exploration of the fuel characteristics of biomass and biochar from oil palm trunk and oil palm fronds for supporting increasing demand of solid biofuels in Thailand. *Energy Reports* [en línea], 2022, vol. 8, p.5641. [Consulta: 15 abril 2023]. ISSN 23524847. Disponible en: DOI 10.1016/j.egy.2022.04.033.

MOYA, R., 2017. Uso de la biomasa forestal y resultados de propiedades dendroenergéticas para especies de interés. [en línea], 2017. p. 20. [Consulta: 15 marzo 2023]. Disponible en: https://fondohondurasespana.bcie.org/fileadmin/fhe/espanol/archivos/publicaciones/Educacion_Superior/6_Intro_Uso_Biomasa_Forestal_Resultados_Dendroenerg.pdf.

PAREDES, J. Investigación en materia de bioenergía para la industria energética. *No. Especial* [en línea], 2015, (Venezuela), vol. 31, pp. 709-716. [Consulta: 10 marzo 2023]. ISSN 1012-1587. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/310/31045569042.pdf>.

PUENTE, E. *Generación eléctrica con biomasa. Evolución de la retribución en este tipo de tecnología* [en línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Carlos III. Leganés-Madrid. 2017. pp. 31-32. [Consulta: 9 febrero 2023]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/27777/TFG_Elena-Maria_Puente_Aranda_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

PUMISACHO, M. & SHERWOOD, S. *El Cultivo de la papa en Ecuador*. Quito- Ecuador. INIAP. 2002. ISBN 9978-92-183-4. pp. 24-35.

PUNIA, R. & KUMAR, S., 2014. Thermogravimetric characterization of wood stalks as gasification and pyrolysis feedstock. *Recent Advances in Bioenergy Research* [en línea], 2014, (India), vol. 3, pp. 8-9. [Consulta: 03 abril 2023]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/281061218>

REGALADO, D. & MARÍN, K. *Determinación de parámetros cinéticos en la combustión de raquis de banano y tallos de rosas* [en línea]. (Trabajo de titulación). Universidad Central del Ecuador. Quito-Ecuador. 2017. pp. 58-80. [Consulta: 25 marzo 2023]. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/11535>.

REZAIYAN, J. & CHEREMISINOFF, N. *Gasification Technologies*. California-USA, 2005. pp. 5-10.

SANAGUANO, S. *Obtención de nanocelulosa a partir de la hoja de mazorca de maíz (Zea*

mays L.) mediante el proceso de hidrólisis ácida [en línea]. (Trabajo de titulación). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Riobamba-Ecuador. 2021. pp.7-9. [Consulta: 19 abril 2023]. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/17692>

SKOOG, D. HOLLER, F & CROUCH, S. *Principios de análisis instrumental* [en línea]. 6th Edition. Mexico. Cengage Learning, 2008. [Consulta: 27 abril 2023] ISBN 13: 978-607-481-390-6. Disponible en: www.FreeLibros.me.

VARGAS, Y. & PÉREZ, L. Aprovechamiento de residuos agroindustriales para el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas* [en línea], 2018, vol. 14, pp. 60-70. [Consulta: 16 marzo 2023]. ISSN 1900-4699. DOI 10.18359/rfcb.xxxx. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.18359/rfcb.xxxx>.

VILLA, M., CRESPO, L. & CRUZ, J. Biocombustibles, una alternativa ecológica para el desarrollo sostenible en el Ecuador. *Revista Dilemas Contemporáneos* [en línea], 2021, pp. 3-5. [Consulta: 19 febrero 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2719>.

WILSON, L.; et al. 2011. Thermal characterization of tropical biomass feedstocks. *Energy Conversion and Management* [en línea], vol. 52, pp. 191-198. [Consulta: 06 abril 2023]. ISSN 01968904. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.06.058>



ANEXO B: IMÁGENES BIOMASA



Briqueta de biomasa de cáscara de papa y tusa de maíz.



Muestra de biomasa para análisis elemental y termogravimétrico.

ANEXO C: INFORME ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ÁREA DE INVESTIGACIÓN



INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO

1. Información general

Orden de trabajo N°: **071** N° Informe: **071**
Ref. Proforma: **AI-2022- 071**

Razón Social / Nombre Apellido:	Wilson Sarmiento		
RUC ó CI:	0604540298		
Dirección:	Financiera parroquia Cubijes calle Amazonas y Pinarco Gallegos		
Fecha de emisión:	16 de diciembre del 2022		
Fecha de muestreo:	N/A	Muestra tomada por:	Cliente
Fecha de recepción de la muestra:	5 de diciembre del 2022		
Fecha de realización del análisis:	12 de diciembre del 2022		
Correo electrónico:	wilsonarmiento@gmail.com		
Teléfono:	0999125812	Teléfono:	0999125812
Persona de Contacto:	Wilson Sarmiento		

2. Especificaciones del ensayo

Muestra:	Muestra de biomasa
Descripción:	Muestra de biomasa
Tipo:	N/A
Equipo:	TC-GC-MS
Lugar:	Laboratorio A-210
Analista:	Ing. Pablo Londoño
Descripción:	Método interno
Observaciones:	

3. Resultados

Los resultados documentales de respaldo se envían al correo electrónico del cliente.

N°	Tr (min)	Molécula identificada	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)
1	3.706	Carbon dioxide	89.7	22.82
2	4.883	Carbon dioxide	72.2	88.951
3	7.947	Methyl glyoxal	80.3	0.133
4	11.639	Acetic acid	79.9	0.061
5	11.96	Acetic acid	76.5	0.143
6	13.032	Acetic anhydride	38.5	0.136
7	14.199	Acetic anhydride	46	0.296
8	19.296	Tridecane	6.04	0.626
9	20.824	Formal	73.04	0.064
10	20.812	2-Hexenal, (E)-	56.5	0.705
11	21.557	2-Furanmethanol	89.6	0.304
12	21.821	2,3-Dioxanedione	54.4	0.13
13	24.996	2,3-Dioxabicyclo[2.2.1]heptane, 1-methyl-	21	0.242
14	25.314	Butyrolactone	73.6	0.137
15	25.869	2-Dodecen-1-ol	27	0.792



16	26.258	1,4-Dioxanediol, 2,3-bis(methylene)-	26.7	0.132
17	27.589	Phenol	54.8	0.094
18	30.441	Octene, 2,4,6-trimethyl-	6.03	0.619
19	31.442	2-Decenal, (Z)-	37.2	3.12
20	32.506	Hexadecane	8.32	3.674

M2 800 C (0-1 min)

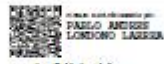
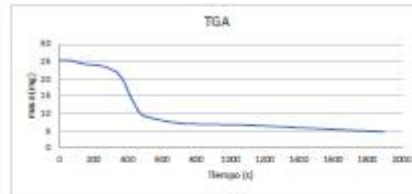
N°	Tr (min)	Molécula identificada	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)
1	4.474	Carbon dioxide	62.00	90.729
2	7.616	Methyl glycol	50.40	0.298
3	9.508	Furan, 2,5-dihydro-	28.00	0.071
4	10.398	2-Butanone, 3-methyl-	19.90	0.064
5	11.902	Acetic acid	79.40	0.174
6	19.252	Formamide, N,N-dimethyl-	91.90	0.109
7	20.614	Furfural	61.60	0.164
8	20.78	2-Cyclohexan-1-one, 2-methyl-	6.88	0.145
9	21.549	2-Furanmethanol	67.90	0.128
10	21.817	2,3-Dibutanedione	31.70	0.166
11	22.349	2,4-Decadienal	45.70	0.404
12	24.578	8-Undecene, (Z)-	4.29	0.333
13	25.12	Undecane	7.91	0.882
14	25.314	Butyrolactone	58.90	0.127
15	27.755	2-Decenal, (Z)-	16.00	5.567
16	30.432	Undecanal	20.10	0.65

M3 800 C (1-2 min)

N°	Tr (min)	Molécula identificada	Probabilidad (%)	Porcentaje relativo (%)
1	4.474	Carbon dioxide	60.70	95.045
2	7.614	Methyl glycol	31.30	0.398
3	9.831	Methacrolein	55.70	0.069
4	10.403	2-Butanone, 3-methyl-	9.96	0.068
5	11.902	Acetic acid	77.60	0.259
6	20.607	Furfural	75.50	0.156
7	20.783	2-Cyclohexan-1-one	55.00	0.069
8	21.544	2-Furanmethanol	64.40	0.081
9	21.816	2-Propanone, 1-(cyclohexyl)-	30.90	0.103
10	25.308	Butyrolactone	60.60	0.147
11	28.437	Heptadecane, 2-methyl-	7.34	1.587
12	29.829	Undecanal	18.50	0.869
13	30.519	Oxalic acid, isobutyl nonyl ester	4.33	1.125



NOTA: En el caso de identificarse la misma molécula en diferentes tiempos de retención, esto puede deberse a pesos moleculares semejantes o isómeros que el detector no es capaz de diferenciar. Los picos asociados a la columna no se han tomado en cuenta en la integración.



Este es un documento por:
PABLO JIMENEZ
LONDROSO LAJUNGA

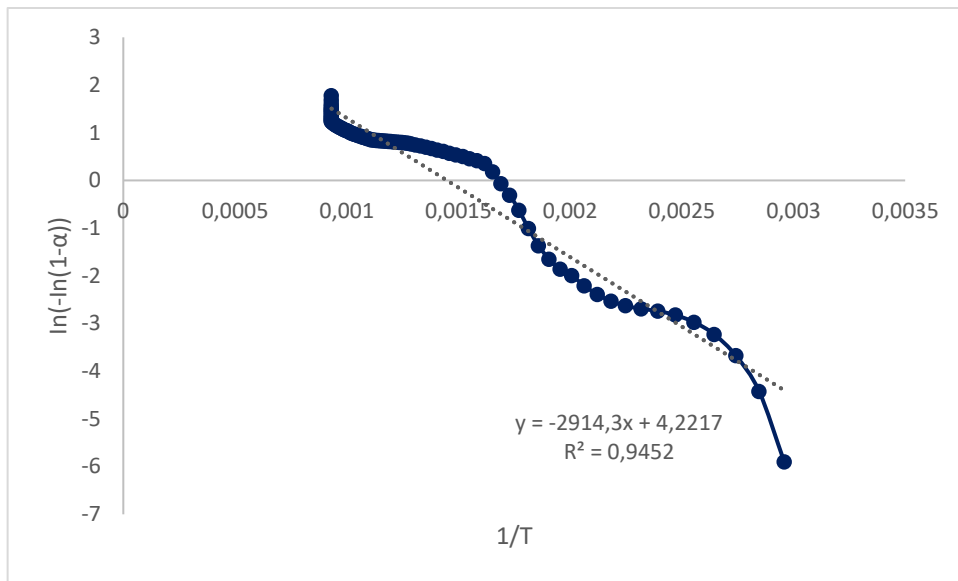
Ing. Pablo Loedolo
Responsable Técnico
16 de diciembre del 2022

El informe no se puede reproducir de manera total o parcial sin la autorización del laboratorio.
Descargo de responsabilidad por muestras o información entregada por el cliente

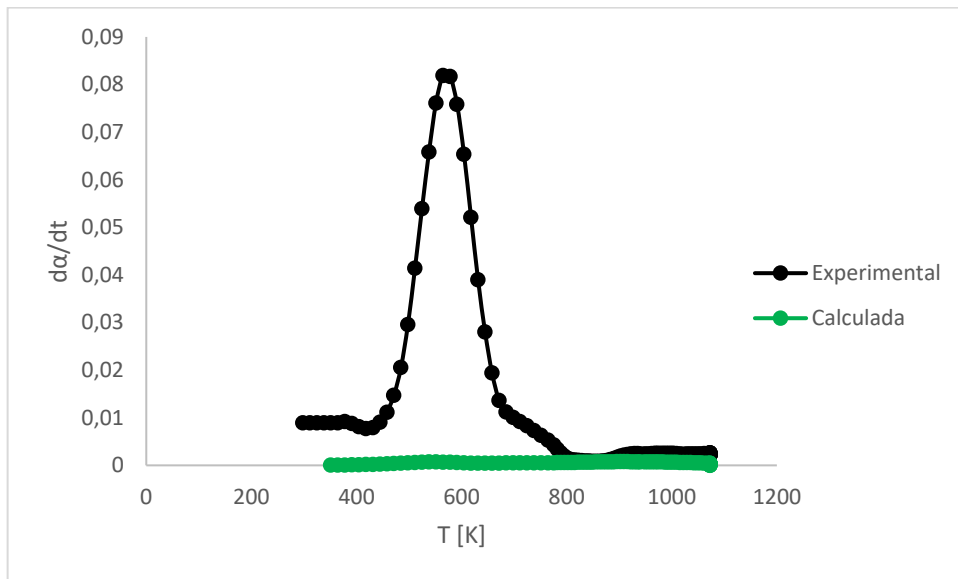
FIN DEL INFORME

ANEXO D: MODELOS CINÉTICOS

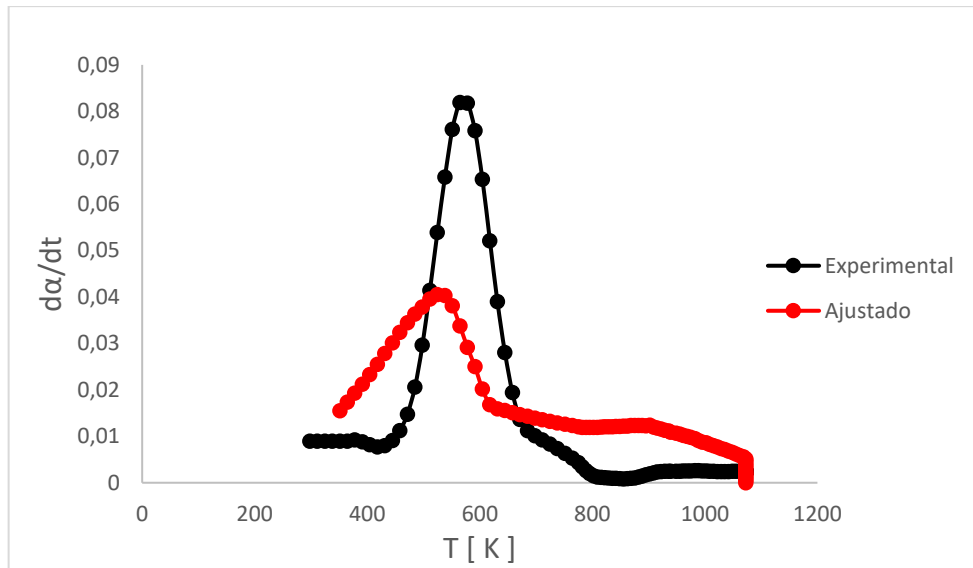
MODELO CINÉTICO 1



Regresión Lineal del Modelo 1

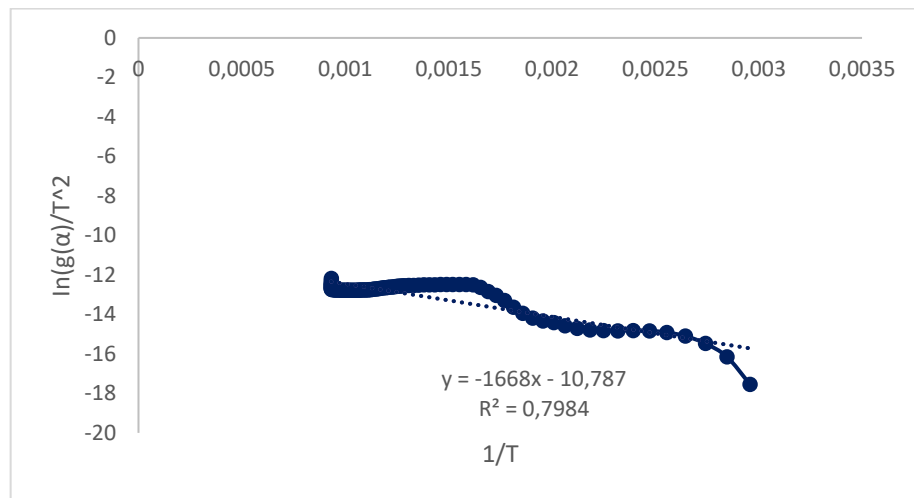


Resultado Modelo 1 y Experimental, 20 °C/min, 1mm.

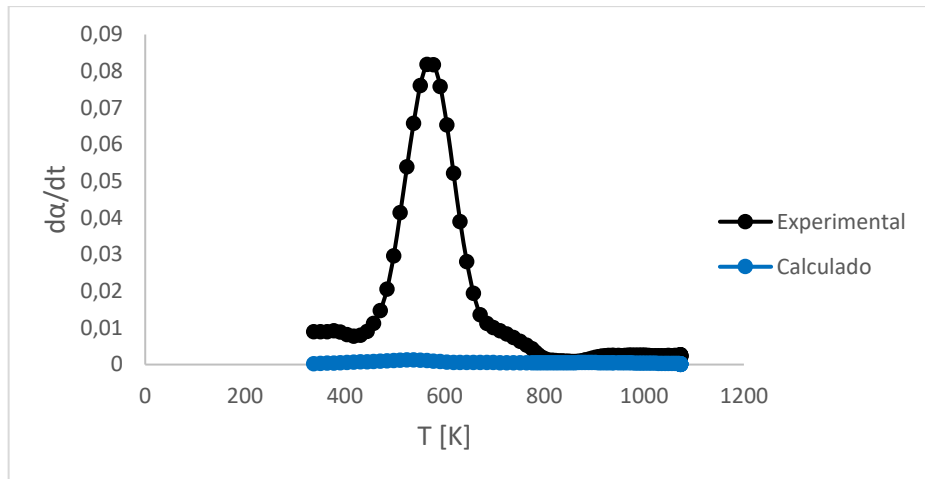


Resultado Modelo Ajustado I y Experimental, 20 °C/min, 1mm.

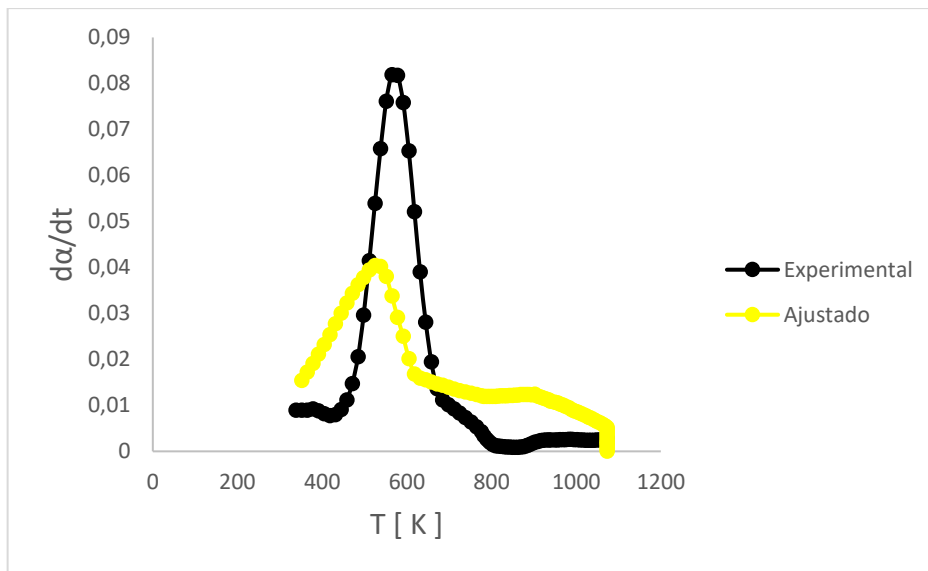
MODELO CINÉTICO 2



Regresión Lineal del Modelo 2



Resultado Modelo 2 y Experimental, 20 °C/min, 1mm.



Resultado Modelo Ajustado II y Experimental, 20 °C/min, 1mm.



epoch

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 11 / 01 / 2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Wilson Andrés Samaniego Chávez
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniero Químico
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

2078-DBRA-UPT-2023

