

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



**PODER CALORÍFICO MEDIANTE TGA/DSC DE LA BIOMASA DE LOS BROTES
DE *Eucalyptus globulus* (EUCALIPTO) PROCEDENTE DE PLANTACIONES,
HUÁNUCO-PERÚ**

Tesis

Para optar el título de:

INGENIERO FORESTAL

Presentado por:

KEIKO MIREILLE CALERO REYES

Tingo María – Perú

2024



ACTA DE SUSTENTACION DE TESIS N°074-2024-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 05 de julio de 2024, a horas 08:00 a.m. de la Escuela Profesional de Ingeniería Forestal de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“PODER CALORÍFICO MEDIANTE TGA/DSC DE LA BIOMASA DE LOS
BROTOS DE *Eucalyptus globulus* (EUCALIPTO) PROCEDENTE DE
PLANTACIONES, HUÁNUCO- PERÚ”**

Presentado por el Bachiller: **CALERO REYES, Keiko Mireille**, después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de “**MUY BUENA**”.

En consecuencia, el sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO FORESTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 15 de julio de 2024

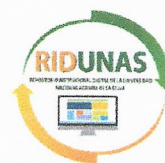

Ing. M. Sc. **RICARDO OCHOA CUYA**
PRESIDENTE


Ing. MSc. **LAURIANO ZAVALETA DE LA CRUZ**
MIEMBRO


Ing. **JORGE L. VERGARA PALOMINO**
MIEMBRO




Ing. MSc. **WILFREDO TELLO ZEVALLOS**
ASESOR



“Año del Bicentenario, de la consolidación de nuestra Independencia, y de la conmemoración de las heroicas batallas de Junín y Ayacucho”

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N° 259 - 2024 - CS-RIDUNAS

El Director de la Dirección de Gestión de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% (Art. 3° - Resolución N° 466-2019-CU-R-UNAS).

Programa de Estudio:


Ingeniero Forestal

Tipo de documento:

Tesis	X	Trabajo de Suficiencia Profesional	
-------	---	------------------------------------	--

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE DE SIMILITUD
PODER CALORÍFICO MEDIANTE TGA/DSC DE LA BIOMASA DE LOS BROTES DE <i>Eucalyptus globulus</i> (EUCALIPTO) PROCEDENTE DE PLANTACIONES, HUÁNUCO-PERÚ	KEIKO MIREILLE CALERO REYES	20 % Veinte

Tingo María, 23 de agosto de 2024


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE GESTIÓN DE LA INVESTIGACIÓN
Dr. Tomas Menacho Mallqui
JEFE
C.C. Archivo

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FORESTAL



PROYECTO DE TESIS

Título	: Poder calorífico mediante TGA/DSC de la biomasa de los brotes de <i>Eucalyptus globulus</i> (eucalipto) procedente de plantaciones, Huánuco-Perú
Autor (es)	: Keiko Mireille Calero Reyes
Asesor (es)	: Ing. Wilfredo Tello Zevallos Ing. Tania Elizabeth Guerrero Vejarano
Objetivo general	: Analizar el poder calorífico de biomasa de los brotes mediante análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) de <i>Eucalyptus globulus</i> (eucalipto) procedente de plantaciones, Huánuco-Perú
Área de investigación	: Transformación e innovación de recursos forestales
Grupo de investigación	: Transformación e innovación de recursos forestales
Línea de investigación	: Transformación química de los recursos forestales
Lugar de ejecución	: Laboratorio Central de Investigación de la UNAS
Duración del trabajo	: 7 meses
Financiamiento	: FEDU (No) Propio (Si) Otros (No)
Presupuesto	: S/. 3795,00
	Tingo María – Perú

Julio, 2024

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo, ante todo, a Dios, por darme la vida y permitirme llegar a este momento crucial en mi carrera. A mis padres, que han sido mi mayor apoyo y siempre me han mostrado su amor y respaldo incondicionales. A mis abuelos, por confiar en mí. A mi hermana y hermano, por inspirarme a ser el mejor ejemplo posible para ellos. A toda mi familia, que me animó a no rendirme.

AGRADECIMIENTOS

- Agradezco a Dios por protegerme a lo largo de mi camino y darme la fortaleza para superar todos los desafíos y dificultades en mi vida.
- A mis padres, por confiar en mí, brindarme apoyo incondicional y enseñarme a no rendirme jamás, además de sus sabios consejos que siempre me motivan a seguir adelante.
- A mis hermanos, por inspirarme a ser el mejor ejemplo que ellos puedan tener.
- A mis abuelos por sus consejos y palabras de aliento.
- A toda mi familia en general, quienes me han apoyado de corazón.
- Al Ing. Wilfredo Tello Zevallos, mi asesor de tesis, por su guía y orientación en la realización de presente trabajo.
- Agradezco también a todas las personas que, de una forma u otra, contribuyeron a la realización de este proyecto.

ÍNDICE

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. Marco teórico.....	3
2.1.1. Calor.....	3
2.1.2. Poder calorífico.....	3
2.1.2.1. Poder calorífico superior.....	3
2.1.2.2. Poder calorífico inferior.....	4
2.1.3. Análisis próximo.....	4
2.1.3.1. Carbono fijo.....	4
2.1.3.2. Humedad.....	4
2.1.3.3. Materia volátil.....	4
2.1.3.4. Cenizas.....	5
2.1.4. Energía.....	5
2.1.4.1. Importancia de la energía.....	5
2.1.4.2. Unidades de medida de energía.....	5
2.1.4.3. Energía de la biomasa forestal.....	6
2.1.5. Calorímetro Labsys Evo Robot TGA-DSC.....	6
2.1.5.1. Presentación.....	6
2.1.5.2. Características técnicas.....	7
2.1.6. Generalidades de <i>E. globulus</i>	8
2.1.6.1. Descripción taxonómica.....	8
2.1.6.2. Descripción botánica.....	9
2.1.6.3. Silvicultura.....	9
2.2. Estado del arte.....	9
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	13
3.1. Lugar de ejecución del trabajo de investigación.....	13
3.2. Material y métodos.....	14
3.2.1. Metodología.....	14
3.2.1.1. Análisis próximo mediante termogravimetría (TGA) de la corteza y madera de los brotes de tres edades de <i>E. globulus</i>	14

3.2.1.2. Poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI) mediante TGA/DSC de la corteza y madera	16
3.2.1.3. Análisis del comportamiento de la biomasa a través del análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido (DSC) de <i>E. globulus</i> en el proceso de combustión	17
3.2.1.4. Factores estudiados con sus respectivos niveles	17
3.2.1.5. Análisis de resultados.....	18
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
4.1. Análisis próximo mediante termogravimetría (TGA) de la corteza y xilema de los brotes de tres edades de <i>E. globulus</i>	20
4.2. Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) mediante TGA/DSC de la corteza y xilema de <i>E. globulus</i>	24
4.3. Análisis del comportamiento de la biomasa a través del análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) en el proceso de combustión.....	26
V. CONCLUSIONES.....	30
VI. PROPUESTAS A FUTURO	31
VII. REFERENCIAS	32
VIII. ANEXO	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Coordenadas UTM de la plantación	14
2. Factores estudiados con sus respectivos niveles.....	18
3. Análisis de varianza.....	18
4. Prueba de Tukey para el tipo de biomasa respecto al análisis próximo	20
5. Prueba de Tukey para la edad del brote respecto al análisis próximo.....	21
6. Análisis próximo de la biomasa de <i>E. globulus</i>	22
7. Prueba de Tukey para el tipo de biomasa respecto al poder calorífico	24
8. Prueba de Tukey para la edad de los brotes respecto al poder calorífico.....	24
9. Poder calorífico superior e inferior de <i>E. globulus</i>	25
10. Análisis de varianza (ANVA) para el contenido de humedad.....	39
11. ANVA para el material volátil	39
12. ANVA para el contenido cenizas	39
13. ANVA para el contenido de carbono fijo.....	40
14. ANVA para el poder calorífico superior	40
15. ANVA para el poder calorífico inferior	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Labsys™ Evo Robot (Setaram).....	7
2. Ubicación de las plantaciones <i>E. globulus</i>	13
3. Análisis termogravimétrico (TGA) y análisis termogravimétrico diferencial (DTG) del proceso pirolítico de <i>E. globulus</i>	23
4. Análisis termogravimétrico (TGA) y análisis termogravimétrico diferencial (DTG) del proceso de combustión de <i>e. globulus</i>	27
5. Análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) del proceso de combustión de <i>E. globulus</i>	28
6. Recolección de xilema y corteza usando barreno de pressler	41
7. Muestra de xilema en proceso de oreado.....	41
8. Muestras frescas de xilema codificadas y embaladas en sorbetes de plástico.....	42
9. Muestra de xilema en proceso de secado en estufa	42
10. Proceso de molienda de la corteza y xilema del <i>E. globulus</i>	43
11. Muestra molida de xilema seca a la humedad de equilibrio de la zona	43

RESUMEN

El objetivo fue analizar el poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) de corteza y xilema de *Eucalyptus globulus* de brotes de plantaciones de 3, 5 y 8 años en Cochacalla, Huánuco. Para ello, se recolectaron 126 muestras (42 por edad) utilizando barreno de Pressler, acondicionándolas mediante secado en estufa, molienda y tamizado a 250 μm . El análisis próximo determinó el contenido de humedad, materia volátil, ceniza y carbono fijo. La prueba de Tukey ($P < 0,01$) mostró que la corteza tiene más materia volátil, ceniza y carbono fijo que el xilema, mientras que el xilema contiene más humedad. En cuanto al poder calorífico, la corteza presentó valores más altos tanto en PCS como en PCI, con diferencias estadísticamente significativas. Además, se encontró una correlación entre la edad de los brotes y el poder calorífico, siendo el máximo valor en brotes de 5 años. Los resultados también revelaron tres zonas de degradación durante el proceso de combustión: pérdida de humedad, combustión activa (hemicelulosa, celulosa y lignina), y volatilización. La evaluación de estas zonas mediante TGA y DSC permitió estimar la entalpía y los productos gaseosos generados durante la combustión. En conclusión, la corteza de *E. globulus* demostró un mayor poder calorífico en comparación con el xilema, y los brotes de 5 años mostraron los valores más altos, sugiriendo un alto potencial para aplicaciones energéticas.

Palabras clave: Entalpía, capacidad calorífica, poder energético, calor de reacción, contenido total de energía

ABSTRACT

The objective was to analyze the superior calorific value (PCS – acronym in Spanish) and inferior calorific value (PCI – acronym in Spanish) from the bark and xylem of *Eucalyptus globulus* sprouts from three, five and eight year old plantations in Cochacalla, Huánuco, [Peru]. In order to do this, 126 samples (forty two per age) were collected utilizing a Pressler drill, they were conditioned through drying in a stove, [then] ground and sifted at 250 μm . From the proximal analysis the humidity content, volatile material, ash, and fixed carbon were determined. The Tukey test ($P < 0.01$) revealed that the bark had more volatile material, ash and fixed carbon than the xylem, while the xylem contained more humidity. With respect to the calorific value, the bark presented higher values, as much for the PCS, as for the PCI, with different statistical significances. Moreover, a correlation was found between the age of the sprouts and the calorific value, with the five year old sprouts having the maximum value. The results also revealed three degraded zones during the combustion process: humidity loss, active combustion (hemicellulose, cellulose and lignin), and volatilization. The evaluation of these zones using the TGA and DSC allowed for the enthalpy and the gas products generated during the combustion to be estimated. In conclusion, the *E. globulus* bark demonstrated a greater calorific value in comparison with the xylem, and the five year old sprouts showed higher values, suggesting a high potential for energetic applications.

Keywords: Enthalpy, calorific capacity, energetic power, reaction heat, total energy content

I. INTRODUCCIÓN

La cantidad de energía que se puede obtener de fuentes renovables, como la hidroeléctrica, eólica, solar y biomasa, supera a la proveniente de fuentes tradicionales como el petróleo, el gas y el carbón. A pesar de ello, el uso de energías renovables sigue siendo reducido. El desarrollo tecnológico, el incremento de la conciencia social, y el menor costo de instalación con una rápida amortización han llevado a un mayor uso de fuentes de energía renovable en tiempos recientes.

En el Perú, la información sobre el análisis del poder calorífico de los brotes que surgen después de la tala en plantaciones forestales es limitada. Se ha identificado que el principal problema que afecta a la cadena productiva del carbón es el bajo rendimiento en la carbonización, lo que se traduce en altos costos de producción y baja eficiencia en el uso de recursos para su fabricación. Por esta razón, el presente estudio de investigación propone determinar el poder calorífico, proporcionando información técnico-científica. Dada la escasa comprensión del poder calorífico de los brotes de *Eucalyptus globulus* Labill. en relación con la edad, surge la pregunta: ¿Cuál es el poder calorífico de los brotes de *E. globulus* en función de su edad?.

El análisis del poder calorífico es fundamental para comprender su potencial como fuente de energía. A medida que crece el interés por las energías renovables y sostenibles, la biomasa se convierte en una alternativa atractiva para reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir el impacto ambiental. Estudiar el poder calorífico de estos brotes no solo permite determinar su eficacia energética, sino también identificar oportunidades para mejorar los procesos de producción de biocombustibles y otras aplicaciones energéticas. Además, este conocimiento puede impulsar la economía local y fomentar prácticas forestales más sostenibles, beneficiando a las comunidades involucradas en el cultivo de eucalipto y promoviendo el uso responsable de los recursos naturales.

La información generada en presente trabajo servirá como información científica y técnica a las instituciones y centros de investigación que estén involucrados en este campo de la energía y asimismo lo cual permitirá tomar decisiones en el uso de la biomasa con fines energéticos y en las políticas de reforestación.

Por otro lado, la hipótesis del presente trabajo radica en que la especie *E. globulus* a mayor edad posee mayor poder calorífico. En virtud de ello se plantea los siguientes objetivos:

1.1. Objetivo general

- ❖ Evaluar el poder calorífico de la biomasa de los brotes mediante análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) de *Eucalyptus globulus* (eucalipto) procedente de plantaciones, Huánuco-Perú

1.2. Objetivos específicos

- ❖ Realizar el análisis próximo mediante termogravimetría (TGA) de la corteza y madera de los brotes de tres edades de *E. globulus* procedente de plantaciones, Huánuco-Perú
- ❖ Evaluar el poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) mediante TGA/DSC de la corteza y xilema de los brotes de tres edades de *E. globulus* procedente de plantaciones, Huánuco-Perú
- ❖ Analizar el comportamiento de la biomasa a través del análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido (DSC) en el proceso de combustión de *E. globulus* procedente de plantaciones, Huánuco-Perú

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Marco teórico

2.1.1. Calor

La energía que posee un objeto por el movimiento constante de sus átomos y moléculas, que vibran, se desplazan y chocan entre sí (Arnold, 1998).

2.1.2. Poder calorífico

El poder calorífico de un combustible se refiere a la energía liberada durante la combustión por unidad de masa de dicho combustible. La forma de medirlo puede influir en el valor obtenido (Andrés, 2008).

El poder calorífico representa el calor que se genera al quemar una unidad de masa del combustible y se suele medir en Kcal/Kg. También puede definirse como la cantidad de energía liberada por cada unidad de masa de un combustible al arder (Hinostroza, 1994).

Las especies vegetales que contienen más lignina, extractos y tienen mayor densidad tienden a tener un poder calorífico más alto que aquellas con mayor proporción de celulosa. Asimismo, el poder calorífico tiende a aumentar con la edad del árbol (Hinostroza, 1994).

2.1.2.1. Poder calorífico superior

Es la cantidad de calor producido a presión atmosférica cuando los productos de la combustión se enfrían hasta la temperatura ambiente. Representa la cantidad total de calor liberado en la combustión completa de un kilogramo de combustible, teniendo en cuenta que el vapor de agua generado en el proceso se condensa y se incluye en el cálculo (Guimaraes et al., 1982).

2.1.2.2. Poder calorífico inferior

Es la cantidad total de calor liberado durante la combustión completa de un kilogramo de combustible, sin incluir el calor latente del vapor de agua resultante de la combustión, ya que este vapor no cambia de fase y se expulsa como tal (Guimaraes et al., 1982).

2.1.3. Análisis próximo

El análisis próximo proporciona información básica sobre la caracterización del biochar, incluyendo humedad, materia volátil, carbono fijo, y contenido de cenizas. El contenido de cenizas se relaciona básicamente con el valor de cal (óxido de calcio) y el contenido de elementos inorgánicos del biochar. Mientras que la materia volátil y el carbono fijo se utilizan con el fin de determinar las fracciones de biochar frágiles y recalcitrantes (ASTM D3172-89, 2002).

2.1.3.1. Carbono fijo

El carbono fijo es el carbono que queda tras la eliminación del contenido de cenizas, la humedad total y la materia volátil en la muestra de carbón. El carbono fijo es básicamente carbono, pero contiene trazas de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre, que no se eliminan con gases y se miden según ASTM D3172 (2013).

2.1.3.2. Humedad

La humedad es una de las variables de mayor importancia atribuidas a la biomasa y a los productos obtenidos de esta luego de la aplicación de un proceso de transformación termoquímica, ya que la eliminación de agua permite el aprovechamiento óptimo de la capacidad energética. El procedimiento realizado se hizo mediante la técnica estándar para análisis de humedad en carbón y coque (ASTM D3172, 2011).

2.1.3.3. Materia volátil

Se considera materia volátil al conjunto de constituyentes de la biomasa (a excepción de la humedad), que se desprendan de la partícula cuando se calienta. Los compuestos volátiles

proceden tanto de la parte orgánica de la biomasa como de la inorgánica. La diferencia entre el porcentaje de pérdida de peso y porcentaje de humedad equivale a la materia volátil de la muestra (ASTM D3175, 2011).

2.1.3.4. Cenizas

El porcentaje de cenizas indica la fracción de residuos inorgánicos que quedan luego de la ignición u oxidación completa de la materia orgánica (ASTM D7582, 16).

2.1.4. Energía

La energía es la habilidad para generar un cambio o un movimiento en la materia. Puede manifestarse de diversas formas, como mecánica, térmica, eléctrica y luminosa, y todas comparten la característica de poder realizar trabajo (Olade, 1987). La mayoría de la energía térmica utilizada por la humanidad proviene de la combustión de distintos materiales, como sólidos (por ejemplo, madera) y líquidos (como el petróleo y sus derivados) (Fernandez, 1986).

2.1.4.1. Importancia de la energía

Para la mayoría de las personas que tenemos acceso a energía eléctrica y otras comodidades, resulta desconocido que más de un tercio de la población mundial depende de la leña para cocinar y calentarse. De hecho, casi el 92% de la madera consumida anualmente por los países en desarrollo se utiliza como combustible. En la sierra del Perú, miles de personas dependen principalmente de la biomasa para cocinar, que en su mayoría consiste en leña, bosta y, en menor medida, residuos agrícolas. Como resultado, pocos estudios se han centrado en cuantificar los aspectos energéticos de la sierra peruana (Hinostroza, 2004).

2.1.4.2. Unidades de medida de energía

La energía puede ser medida y cuantificada. Al sumar todas las energías de un cuerpo, obtenemos su energía térmica, cuyo valor suele expresarse en calorías y kilogramos. En resumen, el calor (o energía térmica) de un cuerpo es la suma de las energías de movimiento (energía cinética y mecánica) de sus moléculas (Fernandez, 1986).

2.1.4.3. Energía de la biomasa forestal

En el contexto energético, la biomasa abarca fuentes de energía de origen biológico, tanto sólidas como no sólidas (Aylott et al., 2008). En teoría, la biomasa se considera una fuente inagotable de energía renovable, al igual que la energía geotérmica, solar, hidroeléctrica y eólica. La biomasa actúa como un depósito de parte de la energía solar que llega a la Tierra, almacenada como energía química, y esta categoría incluye leña, desechos forestales y residuos agrícolas (Demirbas, 2004). Es relevante mencionar que la biomasa forestal contiene más energía que la obtenida de cultivos agrícolas (Navickis, 1978).

La biomasa es vista como uno de los principales recursos energéticos, siendo el primer combustible utilizado por la humanidad. La leña ha sido y sigue siendo empleada para cocinar alimentos y para calefacción (Arnold, 1998).

2.1.5. Calorímetro Labsys Evo Robot TGA-DSC

2.1.5.1. Presentación

Labsys™ Evo Robot consta de una estructura que incorpora:

- ❖ Una balanza TG asociada con los sensores DTA y DSC.
- ❖ Un horno de resistencia metálica.
- ❖ Un cambiador automático de muestras.
- ❖ Un paquete de software multitarea que controla los módulos y el cambiador de muestras.

El cambiador de muestras comprende:

- ❖ Un brazo manipulador (1 - Figura 1).
- ❖ Un brazo de bloqueo de la varilla de medición.
- ❖ Una bandeja para sostener los crisoles de Muestra y Referencia (2 - Figura 1).



Figura 1. Labsys™ Evo Robot (Setaram)

2.1.5.2. Características técnicas

- ❖ Suministro eléctrico monofásico: 230 V \pm 10 % 50/60 HZ
- ❖ Potencia total de entrada: 820 VA
- ❖ Equipos de seguridad:
 - Temperatura de seguridad del horno y de la muestra programable mediante software.
 - Dispositivo de seguridad de circulación de agua.
 - Dispositivo de seguridad de apertura del horno: el horno no se puede abrir cuando la presión en la cámara de análisis es inferior a 680 mbar o cuando la temperatura es superior a 70°C.
- ❖ Presión de entrada de gas: Máx. 3 bares.
- ❖ Presión de entrada de agua: Máx. 3 bares.
- ❖ Temperatura ambiente de funcionamiento: De 15°C a 30°C
- ❖ Humedad relativa: Máx. 80 % para temperatura ambiente hasta 31°C, luego disminuyendo al 50 % para temperatura igual a 40°C.
- ❖ Dimensiones (LxHxD):

- Posición de trabajo: 530 x 560 x 580 mm
- Posición elevada: 530 x 760 x 580 mm
- ❖ Peso: 68 kg
- ❖ Rango de temperatura de funcionamiento: De ambiente a 1400°C (utilización estándar), 1600°C (utilización excepcional). Estos valores pueden variar según los sensores, crisoles y gases de barrido utilizados. Por lo tanto, es vital referirse al manual.
- ❖ Velocidad de escaneo: De 0,001 a 100°C/min. Nota: el horno corre el riesgo de envejecer si se utiliza intensivamente a velocidades de escaneo superiores a 50°C/min.
- ❖ Volumen de la muestra (según el sensor utilizado):
 - Crisol de alúmina: 80, 90 y 440 ml
 - Crisol de platino: 80, 100, 380 y 500 ml
 - Crisol de aluminio: 80 y 100 ml

2.1.6. Generalidades de *E. globulus*

2.1.6.1. Descripción taxonómica

La clasificación taxonómica según el Angiosperm Phylogeny Group (APG IV, 2017) es la siguiente:

División	: Angiosperma
Clase	: Magnoliopsida
Orden	: Myrtales
Familia	: Myrtaceae
Género	: <i>Eucalyptus</i>
Especie	: <i>globulus</i>
Nombre científico	: <i>Eucalyptus globulus</i> Labill.

2.1.6.2. Descripción botánica

Esta descripción es una versión más simple de la que se encuentra en Paiva (1997). El *Eucalyptus globulus* Labill, cuando se cultiva en plantaciones, es un árbol esbelto que puede llegar a ser bastante grande. Su corteza tiene colores blanquecinos, gris-azulados o verdosos, y tiende a desprenderse fácilmente del tronco. Las hojas juveniles son ovadas y lanceoladas, sin pecíolo, con tonos verdes y glaucos; las hojas adultas son lanceoladas y falciformes, con pecíolos largos y un color verde oscuro. Los frutos son cápsulas de cuatro caras con forma de pirámide invertida y un pequeño botón en la parte superior. Estos frutos suelen ser solitarios y sin pedúnculo, y son más grandes que los de otras especies del mismo género, como el *E. nitens* o el *E. camaldulensis*, que suelen tener frutos más pequeños, agrupados y con pedúnculos.

El *Eucalyptus globulus* fue descubierto en 1792 y descrito en 1800 por el botánico Jacques Julien Houtton de Labillardière. Esta especie se encuentra de manera natural en algunas áreas de Victoria, en el sureste de Australia, y a lo largo de las costas del sureste y sur de Tasmania, formando bosques mixtos con otros eucaliptos. Crece en terrenos ondulados, a alturas entre 0 y 550 metros sobre el nivel del mar, con precipitaciones anuales entre 600 y 1500 mm, pocas heladas y veranos con temperaturas moderadas (Fernández-López, 1982).

2.1.6.3. Silvicultura

Aunque González-Río et al. (1997) proporcionan una guía detallada para el manejo de la especie, aquí se describen las prácticas culturales llevadas a cabo por los productores, las cuales provienen de diversas experiencias. Asimismo, se incluyen aquellas prácticas que coinciden con las recomendaciones mencionadas anteriormente. Dado que la especie es exótica, todas las masas en Galicia provienen de repoblaciones (plantaciones) o de regeneración natural, ya sea por rebrote o por colonización a través de la dispersión de semillas en nuevos terrenos, considerándose asilvestrada en Galicia (Fernández-López, 1982; Díaz-Balteiro et al., 2008).

2.2. Estado del arte

Hay una amplia gama de estudios sobre diferentes especies forestales. A continuación, se citan algunos trabajos de investigación realizados en este campo de interés:

En un estudio realizado por Godoy (2022) en la Provincia de Chimborazo, se analizó el poder calorífico de *Eucalyptus globulus* y *Piptocoma discolor* para la elaboración de carbón. Se utilizaron cinco muestras de madera por cada especie. Los resultados mostraron que *Eucalyptus globulus* presentó una humedad de madera del 43,88%, una densidad de madera verde de 0,96 g/cm³ y un poder calorífico de 1064,13 kcal/kg para la madera, y de 0,36 g/cm³ y 6719,79 kcal/kg para el carbón. En contraste, *Piptocoma discolor* mostró una humedad de madera del 43,88%, una densidad de madera verde de 0,85 g/cm³ y un poder calorífico de 804,61 kcal/kg para la madera, y de 0,32 g/cm³ y 2604,01 kcal/kg para el carbón. Se concluyó que *Eucalyptus globulus* presentó una mayor eficiencia en el poder calorífico tanto en madera como en carbón. Se recomienda realizar estudios adicionales para evaluar otras especies con mayor densidad en su madera y comparar sus poderes caloríficos.

Gomez-Mendoza (2022) realizó un estudio para determinar la composición química y el poder calorífico de la madera de *Mezilaurus itauba* (Meisn.) Taub. ex Mez y *Anacardium giganteum* W. Hancock ex Engl., de la Concesión Forestal Mendoza en Pucallpa. Los análisis se llevaron a cabo en la Universidad Nacional del Centro del Perú y el Instituto de Investigación Nutricional, La Molina. Se seleccionaron tres árboles por especie, con cuatro repeticiones para cada análisis químico, aplicando normas ASTM como D1110-56, D1107-56, D1106-56, D1105-56, y D-2015-66-1972, además del Método Peróxido-Acético. Para *M. itauba*, el contenido de extractivos fue de 14,54%, celulosa de 44,50%, lignina de 26,17%, y cenizas de 0,38%. Para *A. giganteum*, el contenido de extractivos fue de 22,66%, celulosa de 50,92%, lignina de 16,75%, y cenizas de 1,13%. El poder calorífico superior experimental para *M. itauba* fue de 4595,95 Kcal/Kg, y el superior estimado de 4831,07 Kcal/Kg. Para *A. giganteum*, el poder calorífico superior experimental fue de 4134,20 Kcal/Kg, y el superior estimado de 4598,68 Kcal/Kg. Estos resultados sugieren un buen potencial energético.

En un estudio realizado por Santos (2020) se evaluó el potencial energético de tres especies de pináceas en Durango: *Pinus cooperi*, *Pinus durangensis* y *Pinus engelmannii*. Se recolectaron muestras y se caracterizaron en el laboratorio utilizando la metodología ASTM D 1762-84. Se analizaron variables como contenido de humedad, material volátil, carbón fijo, cenizas y poder calorífico. Se aplicaron pruebas estadísticas descriptivas y de normalidad, mostrando que las variables no siguieron una distribución normal. Se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, encontrando diferencias significativas ($P < 0,05$) entre las

especies. *Pinus cooperi* mostró el mayor potencial calorífico (10213,25 kJ/kg), contenido de humedad (12,58%) y contenido de cenizas (24,63%). Se concluyó que *Pinus cooperi* es la especie con mayor aptitud como combustible para generación de energía.

En un estudio realizado por Alberca y Marco (2019), se evaluó el poder calorífico de la leña de *Eucalyptus globulus* como fuente de energía para cocinar, especialmente en zonas rurales. Se utilizó una fórmula para determinar el tamaño de la muestra de la población, que luego fue encuestada para obtener el volumen de leña promedio consumido por familia al día. Los resultados mostraron que el 75,00% de los campesinos encuestados preferían utilizar *Eucalyptus globulus* como leña. Se concluyó que esta especie es la más utilizada en ambas comunidades debido a su alto poder calorífico.

Cruz y Simon (2019) llevaron a cabo un estudio para medir el poder calorífico de la madera de *Polylepis racemosa* R & P. y *Schinus molle* L. de dos ubicaciones. El diseño estadístico fue de clasificación jerárquica o anidada, utilizando normas NTP y ASTM. La población del estudio incluyó 90 árboles de *Polylepis racemosa* R & P. y 60 de *Schinus molle* L., de los cuales se tomaron dos árboles por especie de cada distrito, preparando 10 probetas y 120 gramos de aserrín por árbol. Los resultados para *Polylepis racemosa* R & P. mostraron un poder calorífico superior estimado (PCS est.) de 4553,37 Kcal/Kg y un poder calorífico inferior experimental (PCI exp.) de 3030,30 Kcal/Kg en Mito, mientras que en Ahuaycha, el PCS est. fue de 4743,17 Kcal/Kg y el PCI exp. de 3318,45 Kcal/Kg. Para *Schinus molle* L., el PCS est. en Mito fue de 4554,34 Kcal/Kg y el PCI exp. de 3036,70 Kcal/Kg. En Ahuaycha, el PCS est. fue de 4436,23 Kcal/Kg y el PCI exp. de 279,360 Kcal/Kg. El estudio buscó resaltar el potencial energético de estas especies para promover la forestación y reforestación de forma sostenible.

De acuerdo con Curo (2019) menciona que el propósito fue determinar el poder calorífico del carbón producido a partir de la madera de *Kageneckia lanceolata* R & P., *Acacia macracantha* H&B y *Escallonia pendula* R & P. Las muestras se obtuvieron del Distrito de Mariscal Cáceres en la provincia y departamento de Huancavelica. Para el estudio, se usaron las normas NTP – 251–010 para medir la humedad, NTP – 251–011 para la densidad, y ASTM-D-2015-66 (1972) para el poder calorífico. Los resultados revelaron los siguientes valores de poder calorífico superior experimental (PCS): 6866,52 Kcal/Kg para *Acacia macracantha* H&B, 6841,62 Kcal/Kg para *Kageneckia lanceolata* R&P, y 6983,00 Kcal/Kg para *Escallonia*

pendula R&P. Para el poder calorífico inferior experimental (PCI), los valores fueron: 6327,52 Kcal/Kg para *Acacia macracantha* H&B y 6444,00 Kcal/Kg para *Escallonia pendula* R&P.

Ríos et al. (2018) evaluaron la densidad básica (DB) y el poder calorífico superior (PCS) en vástagos de *Eucalyptus globulus*, *E. denticulata* y *Acacia dealbata* en plantaciones dendroenergéticas en Biobío, Chile, con densidades de 5000, 10000 y 15000 árboles por hectárea. Se encontraron diferencias significativas en la DB entre especies, con *E. denticulata* mostrando el nivel más alto (0,46-0,49 g.cm⁻³). *E. globulus* y *A. dealbata* mostraron valores de DB similares (0,38-0,45 g.cm⁻³). Para el PCS, se observaron diferencias entre especies y tipos de vástago, con valores más altos en hojas de vástagos proventicios: *E. globulus* (5280 kcal kg⁻¹), *E. denticulata* (5150 kcal.kg⁻¹) y *A. dealbata* (4927 kcal kg⁻¹). Se recomienda el uso de estos vástagos proventicios para fines dendroenergéticos, sugiriendo podas y aclareos para mejorar la DB y el PCS.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución del trabajo de investigación

El trabajo se realizó en el Laboratorio Central de Investigación de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS).

3.1.1. Zona de recolección del material vegetal

Las muestras vegetales empleadas fue la biomasa (corteza y xilema) de los brotes de *E. globulus*, las cuales fueron recolectadas de las plantaciones de tres edades diferentes (3, 5 y 8 años). Las plantaciones se encuentran en el centro poblado Cochacalla, distrito de San Rafael, provincia de Ambo, región Huánuco (**Figura 2**). La densidad de la plantación fue de 2m x 2m haciendo un total de 2500 árboles por hectárea.

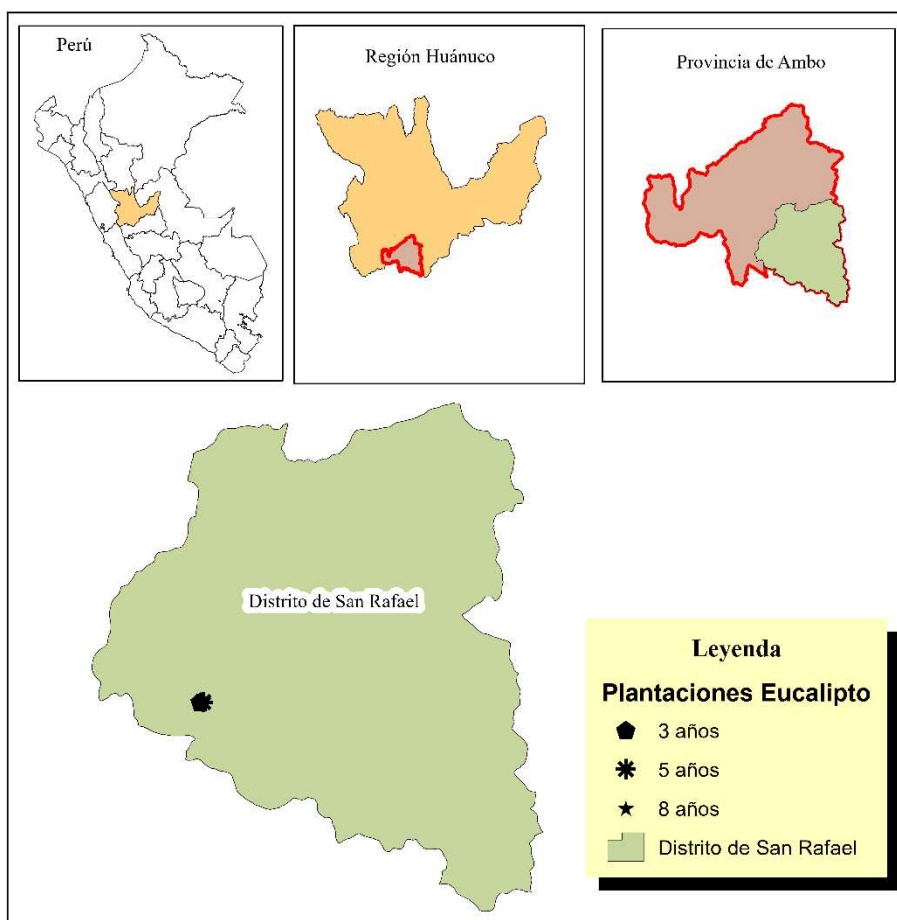


Figura 2. Ubicación de las plantaciones *E. globulus*

La primera plantación fue establecida en el año 2009, luego fue cosechada en el año 2015 y al 2023 los brotes tenían una edad de 8 años. Asimismo, la segunda plantación fue plantada en el año 2012, luego cosechada en 2018 y al 2023 los brotes tenían una edad de 5 años. Finalmente, la plantación más joven fue establecida en el año 2014, luego cosechada en 2020 y al 2023 los brotes tenían una edad de 3 años.

Las coordenadas de cada una de las tres plantaciones de edades diferentes de los brotes están detalladas en el **Tabla 1**. Es importante señalar que existe una hectárea por cada edad de brote de la plantación.

Tabla 1. Coordenadas UTM de la plantación

Edad (años)	Área (ha)	Coordenadas UTM	
		Este	Norte
3	1	368668	8854563
5	1	368833	8854554
8	1	368838	8854636

3.2. Material y métodos

3.2.1. Metodología

3.2.1.1. Análisis próximo mediante termogravimetría (TGA) de la corteza y madera de los brotes de tres edades de *E. globulus*

a. Determinación del tamaño de muestra

El tamaño de muestra fue calculado usando la siguiente ecuación (MINAM, 2014):

$$n = \frac{Z^2 p * q * N}{(N-1)E^2 + Z^2 * p * q} \dots \dots \dots (1)$$

Dónde:

n : Tamaño de la muestra

- Z : Es el valor de la curva normal estandarizada para un nivel determinado de probabilidad (95%=1,96).
- p : Probabilidad de que ocurra el evento estudiado (50%)
- q : Probabilidad de que no ocurra el evento estudiado ($q = 1 - p$) (50%)
- N : Tamaño de la población (2500)
- E : Error de estimación máximo aceptado (15%).

El tamaño de muestra para el presente trabajo fue de 42 muestras por edad de plantación haciendo un total de 126 muestras.

b. Recolección de la muestra vegetal

Las muestras vegetales (corteza y xilema) fueron recolectadas al azar y utilizando el barreno de pressler. Se obtuvieron muestras de xilema y corteza a la altura del DAP (1,3 m), extrayendo cilindros de 5,15 mm de diámetro y evaluando su longitud con un vernier digital. Durante el proceso de recolección, las muestras se recogieron en sorbetes de plástico de 6 mm de diámetro y se transportaron para preservar su forma y tamaño, evitando que se rompieran.

c. Acondicionamiento de la muestra vegetal recolectada

Las muestras recolectadas fueron inicialmente colocadas a secar en una estufa (Memmert) a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta alcanzar un peso constante. Después, se retiraron de la estufa y se molieron utilizando un molino de cuchillas con un tamiz de $250 \mu\text{m}$. Luego, se almacenaron en un lugar fresco y seco hasta alcanzar la estabilización de peso de la muestra, es decir hasta estar en equilibrio con la humedad de la zona (Tingo María).

d. Análisis próximo

El análisis próximo fue realizado con las muestras molidas y tamizadas a $250 \mu\text{m}$ mediante análisis termogravimétrico (TGA) (Labsys Evo Robot - opción de gas TGA-DSC 1600°C) según la norma UNE para medir el contenido de humedad (UNE-EN 14774-1), materia volátil (UNE-EN 15148) y ceniza (UNE-EN 14775). El contenido de humedad (solo este análisis se realizó en una condición isotérmica) y la materia volátil fueron calculados a partir de la diferencia de peso de la muestra después de calentar a 110°C y pirolizar a $150-$

600°C en un entorno de purga de N₂. El contenido de cenizas fue pesado después de la combustión del carbón a 950°C con purga de oxígeno durante 20 min.

El carbono fijo (CF) se puede determinar utilizando algunos de los datos obtenidos previamente en el análisis próximo (Ecuación 2).

$$CF (\%) = 100 - (\%H + \%C + \%VM) \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

%CF : Porcentaje de carbono fijo

%H : Porcentaje de humedad

%VM : Porcentaje de material volátil

3.2.1.2. Poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI) mediante TGA/DSC de la corteza y madera

Las muestras recolectadas fueron pulverizadas en laboratorio y tamizadas a un tamaño de 250 µm según el requerimiento del experimento. Todas las muestras preparadas fueron colocadas en un recipiente hermético para reducir la oxidación y conservar la muestra.

El análisis térmico de todas las muestras de xilema y corteza se llevó a cabo en una condición no isotérmica utilizando un instrumento de análisis térmico simultáneo (STA) por Labsys Evo Robot TGA-DSC (Setaram) para analizar los datos de TGA/DSC, es decir, la pérdida de masa y el flujo de calor. El instrumento STA (TGA-DSC) se calibró con estándares puros de Indio y Aluminio antes de realizar los experimentos (Mandal et al., 2022).

Las muestras se ensayaron aplicando las siguientes condiciones experimentales:

- Atmósfera experimental: mezcla de gases de oxígeno y nitrógeno en la proporción de 20:80.
 - Caudales de los gases: 100 ml.min⁻¹ con 20 ml.min⁻¹ (oxígeno de gas de purga), 60 ml.min⁻¹ (nitrógeno de gas de purga) y 20 mlmin⁻¹ (nitrógeno de gas protector)
 - El tamaño de partícula de la muestra fue de 250 µm
 - Masa de la muestra: 10±2mg

- Rango de temperatura: temperatura ambiente de 30 °C a 850 °C
- Velocidades de calentamiento: 10°C.min⁻¹
- Crisol: alúmina (para minimizar la transferencia de masa y calor)

La determinación del poder calorífico inferior (PCI), fue hallado a partir del poder calorífico superior (PCS), tomando en cuenta el valor del calor de vaporización (539 Kcal/Kg) de la muestra húmeda (Guimaraes et al., 1982). Los resultados fueron expresados a través de la Ecuación 3:

$$\text{PCI} = \text{PCS} - \text{CV} \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

PCI : Poder calorífico inferior (Kcal/Kg)

PCS : Poder calorífico superior (Kcal/Kg)

CV : Calor de vaporización (539 Kcal/Kg)

3.2.1.3. Análisis del comportamiento de la biomasa a través del análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido (DSC) de *E. globulus* en el proceso de combustión

Basado en el análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) en el proceso de combustión de la biomasa se evaluó el comportamiento de la biomasa de *E. globulus*.

3.2.1.4. Factores estudiados con sus respectivos niveles

Los factores y niveles estudiados para el presente trabajo fueron los siguientes **(Tabla 2)**:

Tabla 2. Factores estudiados con sus respectivos niveles

Factores	Niveles	Símbolo
A. Tipo de biomasa	Xilema	a1
	Corteza	a2
B. Edad del brote	3 años	b1
	5 años	b2
	8 años	b3

Asimismo, es importante señalar que los tratamientos (combinación) de acuerdo con los factores detallados en la **Tabla 2**, fueron los siguientes:

- T1 : Xilema*3 años (a1*b1)
 T2 : Corteza*3 años (a2*b1)
 T3 : Xilema*5 años (a1*b2)
 T4 : Corteza*5 años (a2*b2)
 T5 : Xilema*8 años (a1*b3)
 T6 : Corteza*8 años (a2*b3)

3.2.1.5. Análisis de resultados

Los datos fueron analizados bajo un sistema de Análisis de Varianza (ANVA) con arreglo factorial de 2Ax3B. Además, para comparar la diferencia estadística entre promedios, se empleó la prueba de Tukey ($P < 0,01$). El análisis de varianza se presenta en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Análisis de varianza

Fuente de variación	Grados de libertad
Tipo de biomasa (A)	a-1=1
Edad de brote (B)	b-1=2
A*B	(a-1) (b-1)=2
Error experimental	(a*b) (n-1) =12
Total	17

a. Modelo aditivo lineal

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + (A*B)_{ij} + E_{ijk}$$

donde:

Y_{ijk} : Variable respuesta u observación

μ : Media poblacional

A_i : Efecto del i-ésimo tipo de biomasa

B_j : Efecto del i-ésimo edad del brote

$(A*B)_{ij}$: Efecto de la interacción del i – ésimo nivel del factor tipo de biomasa
con el j – ésimo del nivel del factor edad del brote

E_{ijk} : Error experimental

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis próximo mediante termogravimetría (TGA) de la corteza y xilema de los brotes de tres edades de *E. globulus*

El análisis próximo es una técnica utilizada para evaluar la biomasa como fuente de combustible, en la que se determinan los niveles de material volátil (MV), cenizas (Ce) y carbono fijo (CF), tomando como base el peso seco. Si el análisis se realiza en base al peso húmedo, también se considera el contenido de humedad (Jameel et al., 2010).

El análisis de los efectos simples (**Tabla 4**) para el caso del tipo de biomasa, se puede observar la diferencia estadística altamente significativa ($P < 0,01$) para el análisis próximo, siendo mayor la corteza respecto al xilema en relación al contenido de material volátil, ceniza y carbono fijo; solo en el caso del contenido de humedad fue mayor el xilema.

Tabla 4. Prueba de Tukey para el tipo de biomasa respecto al análisis próximo

Tipo de biomasa	Porcentaje ¹			
	Contenido de humedad	Material volátil	Ceniza	Carbono fijo
Corteza	4,56±0,34 ^b	61,49±1,10 ^b	10,77±0,89 ^a	23,18±0,52 ^a
Xilema	5,47±0,34 ^a	71,30±0,33 ^a	5,71±0,47 ^b	17,52±0,15 ^b

¹Los valores representan la media±ES. Letras diferentes (a y b) indican diferencia estadística altamente significativa para la prueba de Tukey ($P < 0,01$).

Por otra parte, al examinar los efectos individuales (**Tabla 5**) asociados con la edad de los brotes, se observa una diferencia estadística altamente significativa ($P < 0,01$) en los resultados del análisis próximo. Los valores más altos se encontraron en los brotes de 8 años en relación al contenido de ceniza y carbono fijo. En contraste, el contenido máximo de material volátil se registró en los brotes de 5 años, mientras que para el contenido de humedad fue en los brotes de 3 años.

Tabla 5. Prueba de Tukey para la edad del brote respecto al análisis próximo

Edad de brotes (años)	Porcentaje ¹			
	Contenido de humedad	Material volátil	Ceniza	Carbono fijo
Ocho	4,94±0,38 ^b	64,48±3,30 ^b	9,46±2,17 ^a	21,12±1,51 ^a
Cinco	4,52±0,38 ^c	67,67±1,93 ^a	7,05±0,92 ^c	20,76±1,39 ^a
Tres	5,59±0,14 ^a	67,03±1,37 ^a	8,22±0,36 ^b	19,17±0,93 ^b

¹Los valores representan la media±ES. Letras diferentes (a-c) indican diferencia estadística altamente significativa para la prueba de Tukey ($P < 0,01$).

Con base en las curvas disminución de peso (W) y la deriva del peso respecto al tiempo (dW/dt), se observaron tres etapas características durante la descomposición térmica de la biomasa: deshidratación, liberación de volátiles y carbonización, previamente discutidas por Lopes y Tannous (2022).

Según los datos de la **Tabla 6**, el análisis próximo muestra diferentes valores según el tipo de biomasa y la edad de los brotes. En cuanto al contenido de humedad, hay una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0,01$), con valores de $5,9 \pm 0,1\%$ para T2 y $3,7 \pm 0,1\%$ para T4. El contenido de humedad afecta negativamente el poder calorífico porque se requiere energía para evaporar el agua. Cuanto mayor sea la humedad, menor será la eficiencia de la madera como combustible, ya que el calor neto disminuye (Bhatt et al., 2010).

De manera similar, el contenido de material volátil también mostró una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0,01$), con valores de $72,0 \pm 0,0\%$ para T3 y $57,1 \pm 0,0\%$ para T6. El material volátil es la parte de los gases y vapores que se libera cuando se calienta el combustible a una temperatura y tiempo específicos (Basu, 2013).

Para el contenido de cenizas, hubo una diferencia significativa ($P < 0,01$), con valores de $14,3 \pm 0,1\%$ para T6 y $4,6 \pm 0,1\%$ para T5. La ceniza es el residuo inorgánico que queda tras la combustión total y contiene metales alcalinos, sílice y otros materiales inorgánicos (Basu, 2013).

Finalmente, para el contenido de carbono fijo, también se observó una diferencia significativa ($P < 0,01$), con valores de $24,5 \pm 0,1\%$ para T6 y $17,8 \pm 0,2\%$ para T1. El carbono

fijo se relaciona con el poder calorífico, pues tiene un impacto positivo en el potencial energético de la biomasa (Rodríguez-Romero, 2022). Los valores en este estudio son más altos que los reportados para otras maderas como *Acacia pennatula* con 12,37%, *Trema micrantha* con 16,31% (Apolinar-Hidalgo et al., 2017), *Acia auriculaeformis* con 14,4% (Kumar et al., 2011), *Acacia mangium* con 20,9% (Barros et al., 2012), y *Acacia mearnsii*, cuyo rango está entre 16,9% y 23,2% (Agostinho-Da Silva et al., 2014; Eloy et al., 2015).

Tabla 6. Análisis próximo de la biomasa de *E. globulus*

Tratamiento	Edad (años)	Biomasa	Porcentaje ¹			
			Contenido de humedad	Material volátil	Ceniza	Carbono fijo
T1	Tres	Xilema	5,29±0,11 ^b	70,07±0,20 ^b	7,53±0,39 ^c	17,11±0,31 ^c
T2		Corteza	5,88±0,08 ^a	64,00±0,30 ^c	8,91±0,08 ^b	21,21±0,16 ^b
T3	Cinco	Xilema	5,35±0,08 ^{ab}	71,98±0,04 ^a	5,00±0,04 ^d	17,67±0,01 ^c
T4		Corteza	3,68±0,10 ^c	63,36±0,17 ^c	9,10±0,22 ^b	23,85±0,38 ^a
T5	Ocho	Xilema	5,78±0,11 ^{ab}	71,84±0,32 ^a	4,62±0,05 ^d	17,76±0,22 ^c
T6		Corteza	4,10±0,004 ^c	57,11±0,03 ^d	14,30±0,06 ^a	24,48±0,10 ^a

¹Los valores representan la media±ES. Letras diferentes (a-d) indican diferencia estadística altamente significativa para la prueba de Tukey ($P<0,01$).

Hay dos tipos de termogravimetría: el análisis termogravimétrico (TGA) y el análisis termogravimétrico diferencial (DTG). El TGA mide la variación en la masa de la muestra o el porcentaje que queda durante el proceso de calentamiento bajo condiciones controladas. Por su parte, el DTG evalúa la velocidad con la que se pierde masa durante el mismo proceso (Aranzazu-Ríos et al., 2013). La **Figura 3A** corresponde a un proceso pirolítico para el xilema de una edad de 8 años (T5), en la cual se muestran tres principales zonas de degradación. En primer lugar, la zona 1, esta puede atribuirse a la pérdida de humedad, la cual se encuentra alrededor de los 37 -135°C con una pérdida de masa del 5,78% y a una velocidad de pérdida de 1,47%/min; la zona 2 corresponde a compuestos intermedios (hemicelulosa, celulosa, lignina) la cual se observa entre 206 a 406°C con una pérdida de masa de 64,46% con una velocidad de pérdida de 14,07%/min, esta etapa puede corresponder propiamente dicha a la etapa de pirólisis activa, teniendo en cuenta su elevada tasa de pérdida de masa (Lapuerta et al., 2004). La zona 3 corresponde a la etapa de volatilización principalmente de la lignina la cual se presenta un rango mayor a los 406°C y presenta una pérdida de masa de 7,37% (Açıkalin, 2012).

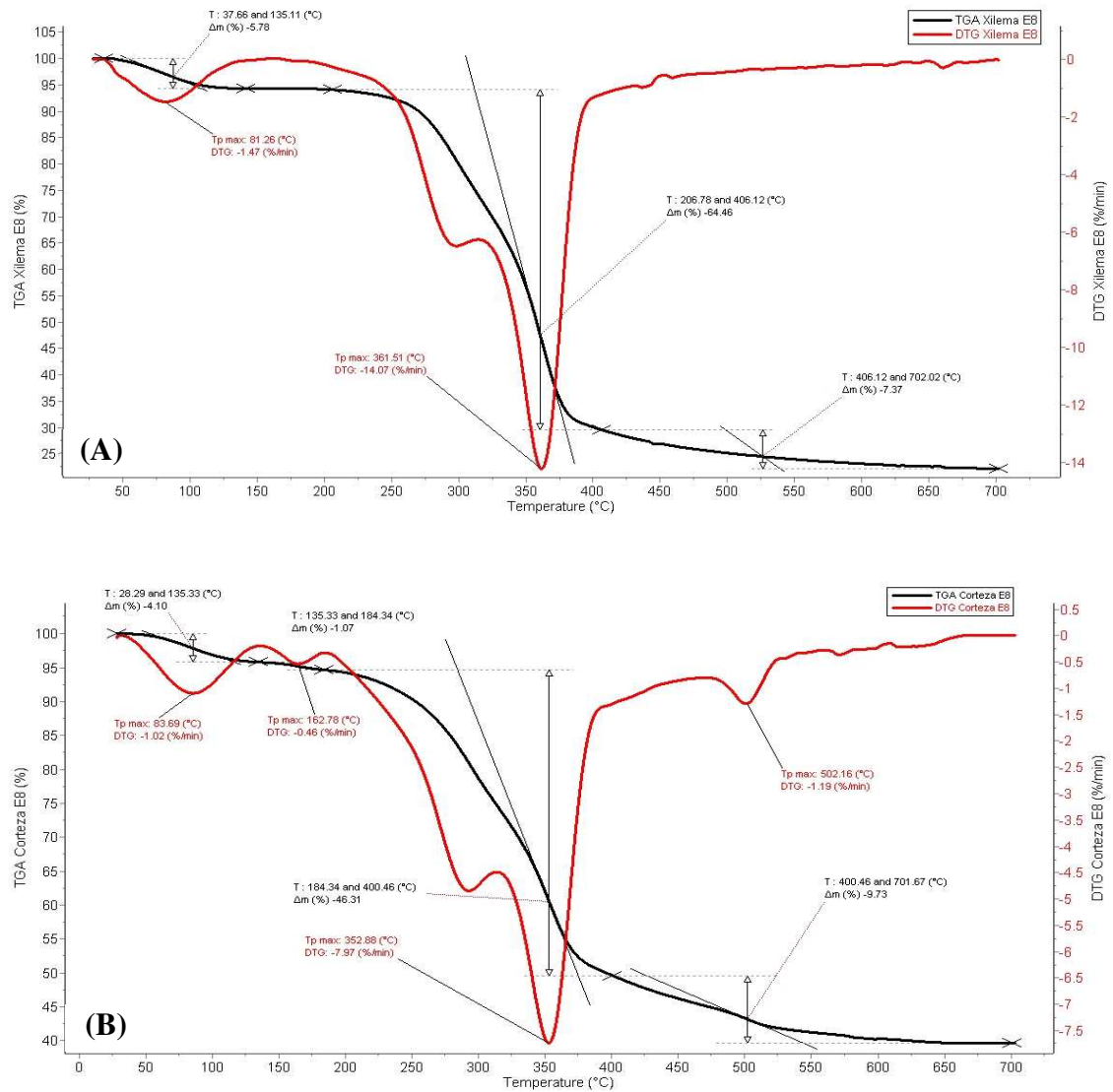


Figura 3. Análisis termogravimétrico (TGA) y análisis termogravimétrico diferencial (DTG) del proceso pirolítico de *E. globulus*. El termograma incluye: (A) análisis de TGA y DTG para el T5 y (B) análisis de TGA y DTG para el T6

De manera análoga para la corteza de una edad de 8 años (T6) en la **Figura 3B** se muestra las tres zonas principales, la zona 1 puede atribuirse a la pérdida de humedad, la cual se encuentra alrededor de los 28 y 135°C con una pérdida de masa del 4,10% y a una velocidad de pérdida de 1,02%/min; la zona 2 corresponde a compuestos intermedios (hemicelulosa, celulosa, lignina) la cual se observa entre 184 a 400°C con una pérdida de masa de 46,31% con una velocidad de pérdida de 7,97%/min, esta etapa puede corresponder propiamente dicha a la etapa de la pirólisis activa, teniendo en cuenta su elevada tasa de pérdida de masa (Lapuerta et al., 2004). La zona 3 corresponde a la etapa de volatilización principalmente de la lignina la

cual se presenta un rango mayor a los 400°C y presenta una pérdida de masa de 9,73% (Açıklın, 2012).

4.2. Poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) mediante TGA/DSC de la corteza y xilema de *E. globulus*

El poder calorífico de un material refleja su contenido energético o la cantidad de calor liberado cuando se quema en presencia de aire, lo que indica el potencial de generación de calor al ser utilizado como combustible (McKendry, 2002; Carbon Trust, 2009). El análisis de los efectos simples (**Tabla 7**) para el caso del tipo de biomasa, se puede observar la existencia de una diferencia estadística altamente significativa ($P < 0,01$) tanto para el poder calorífico superior e inferior, siendo mayor para la corteza para ambos casos.

Tabla 7. Prueba de Tukey para el tipo de biomasa respecto al poder calorífico

Tipo de biomasa	Poder calorífico (Kcal/Kg) ¹		Tukey ($P < 0,01$)
	Superior	Inferior	
Corteza	2080,43±12,00	1541,43±12,00	a
Xilema	1724,49±31,54	1185,49±31,54	b

¹Los valores representan la media±ES. Letras diferentes (a y b) indican diferencia estadística altamente significativa para la prueba de Tukey ($P < 0,01$).

Por otro lado, al analizar los efectos simples (**Tabla 8**) relacionados con la edad de los brotes, se evidencia una diferencia estadísticamente altamente significativa ($P < 0,01$) tanto en el poder calorífico superior como en el inferior. Se observa que el valor más alto se registra en los brotes de 5 años, aunque no se encontraron diferencias estadísticas significativas en comparación con los brotes de 8 años, pero sí en relación con los de 3 años.

Tabla 8. Prueba de Tukey para la edad de los brotes respecto al poder calorífico

Edad de brotes (años)	Poder calorífico (Kcal/Kg) ¹		Tukey ($P < 0,01$)
	Superior	Inferior	
Cinco	1961,71±72,64	1422,71±72,64	a
Ocho	1920,73±71,21	1381,73±71,21	a
Tres	1824,95±97,05	1285,95±97,05	b

¹Los valores representan la media±ES. Letras diferentes (a y b) indican diferencia estadística altamente significativa para la prueba de Tukey ($P < 0,01$).

De acuerdo con los resultados reportado en la **Tabla 9**, se puede observar los valores del poder calorífico en función del tipo de biomasa y edad de los brotes, en tal sentido, para el poder calorífico superior existe diferencia estadística altamente significativa ($P < 0,01$) con valores de $1762,9 \pm 26,3$ y $2086,5 \pm 7,3$ Kcal/Kg para el tratamiento T3 y T4 respectivamente. De manera análoga se observa para el caso del poder calorífico inferior existe diferencia estadística altamente significativa ($P < 0,01$), con valores de $1262,55 \pm 26,17$ y $1582,87 \pm 7,03$ Kcal/Kg para el T3 y T4 respectivamente.

En este estudio, el poder calorífico superior de la madera (T3) de *E. globulus* fue de $1762,9 \pm 26,3$ Kcal/Kg, un valor significativamente menor que el de $4153,92$ Kcal/Kg obtenido por Farfán et al. (1989) para las ramas de *Acacia pennatula*. En México, para diversas especies de Acacia, estos valores también son más bajos que los obtenidos para el tronco (fuste) de *Acacia cochliacantha*, que tiene un poder calorífico de $4153,92$ Kcal/Kg (Farfán et al., 1989). Igualmente, es inferior a los valores registrados para el fuste y superior para las ramas de *Acacia berlandieri* ($4216,07$ Kcal/Kg y $1725,62$ Kcal/Kg, respectivamente), así como para *Acacia wrightii* ($4285,38$ Kcal/Kg para el fuste y $4275,82$ Kcal/Kg para las ramas) (Ngangyo-Heya et al., 2016).

La eficiencia energética de estos materiales puede mejorar con una menor humedad, como se muestra en la **Tabla 9**. Se recomienda que la humedad de la muestra sea inferior al 30% (Fredes-Nuñez, 2014). El alto poder calorífico de estos materiales suele correlacionar con un bajo contenido de humedad (Rincón-Rincón y González-Castillo, 2014).

Tabla 9. Poder calorífico superior e inferior de *E. globulus*

Tratamiento	Edad (años)	Biomasa	Poder calorífico (Kcal/Kg)	
			Superior	Inferior
T1	Tres	Xilema	$1569,4 \pm 27,9^c$	$1070,71 \pm 27,74^c$
T2		Corteza	$2002,5 \pm 1,3^a$	$1501,18 \pm 1,03^a$
T3	Cinco	Xilema	$1762,9 \pm 26,3^b$	$1262,55 \pm 26,17^b$
T4		Corteza	$2086,5 \pm 7,3^a$	$1582,87 \pm 7,03^a$
T5	Ocho	Xilema	$1732,1 \pm 14,7^b$	$1223,21 \pm 14,79^b$
T6		Corteza	$2046,8 \pm 2,9^a$	$1540,25 \pm 3,03^a$

¹Los valores representan la media \pm ES. Letras diferentes (a-c) indican diferencia estadística altamente significativa para la prueba de Tukey ($P < 0,01$).

4.3. Análisis del comportamiento de la biomasa a través del análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) en el proceso de combustión

De acuerdo con la **Figura 4A** corresponde a un proceso de combustión de la corteza de una edad de 5 años (T4), en la cual se muestran tres principales zonas de degradación. En primer lugar, la zona 1, esta puede atribuirse a la pérdida de humedad, la cual se encuentra alrededor de los 42 y 144°C con una pérdida de masa del 5,85% y a una velocidad de pérdida de 1,51%/min; la zona 2, corresponde a compuestos intermedios (hemicelulosa, celulosa, lignina) la cual se observa entre 190°C a 378°C con una pérdida de masa de 53,78% con una velocidad de pérdida de 9,63%/min, esta etapa puede corresponder propiamente dicha a la etapa de combustión activa, teniendo en cuenta su elevada tasa de pérdida de masa (Lapuerta et al., 2004). Finalmente, la zona 3 corresponde a la etapa de volatilización (degradación) principalmente de lignina y fragmentación de celulosa, la cual ocurre en un intervalo de temperatura de 378°C a 705°C y presenta una pérdida de masa de 31,27% a una velocidad de pérdida de 4,77%/min (Açikalın, 2012 y Barrera-Calva et al., 2021).

De manera análoga para la xilema de una edad de 5 años (T3) en la **Figura 4B** se muestra las tres zonas principales, la zona 1 puede atribuirse a la pérdida de humedad, la cual se encuentra alrededor de los 32 y 138°C con una pérdida de masa del 5,85% y a una velocidad de pérdida de 1,62%/min; la zona 2 corresponde a compuestos intermedios (hemicelulosa, celulosa, lignina) la cual se observa entre 209 a 385°C con una pérdida de masa de 64,74% con una velocidad de pérdida de 17,37%/min, esta etapa puede corresponder propiamente dicha a la etapa de combustión activa, teniendo en cuenta su elevada tasa de pérdida de masa (Lapuerta et al., 2004). Finalmente, la zona 3 corresponde a la etapa de volatilización (degradación) principalmente de lignina y fragmentación de celulosa, la cual ocurre en un intervalo de temperatura de 385°C a 705°C y presenta una pérdida de masa de 24,41% a una velocidad de pérdida de 4,85%/min (Açikalın, 2012 y Barrera-Calva et al., 2021).

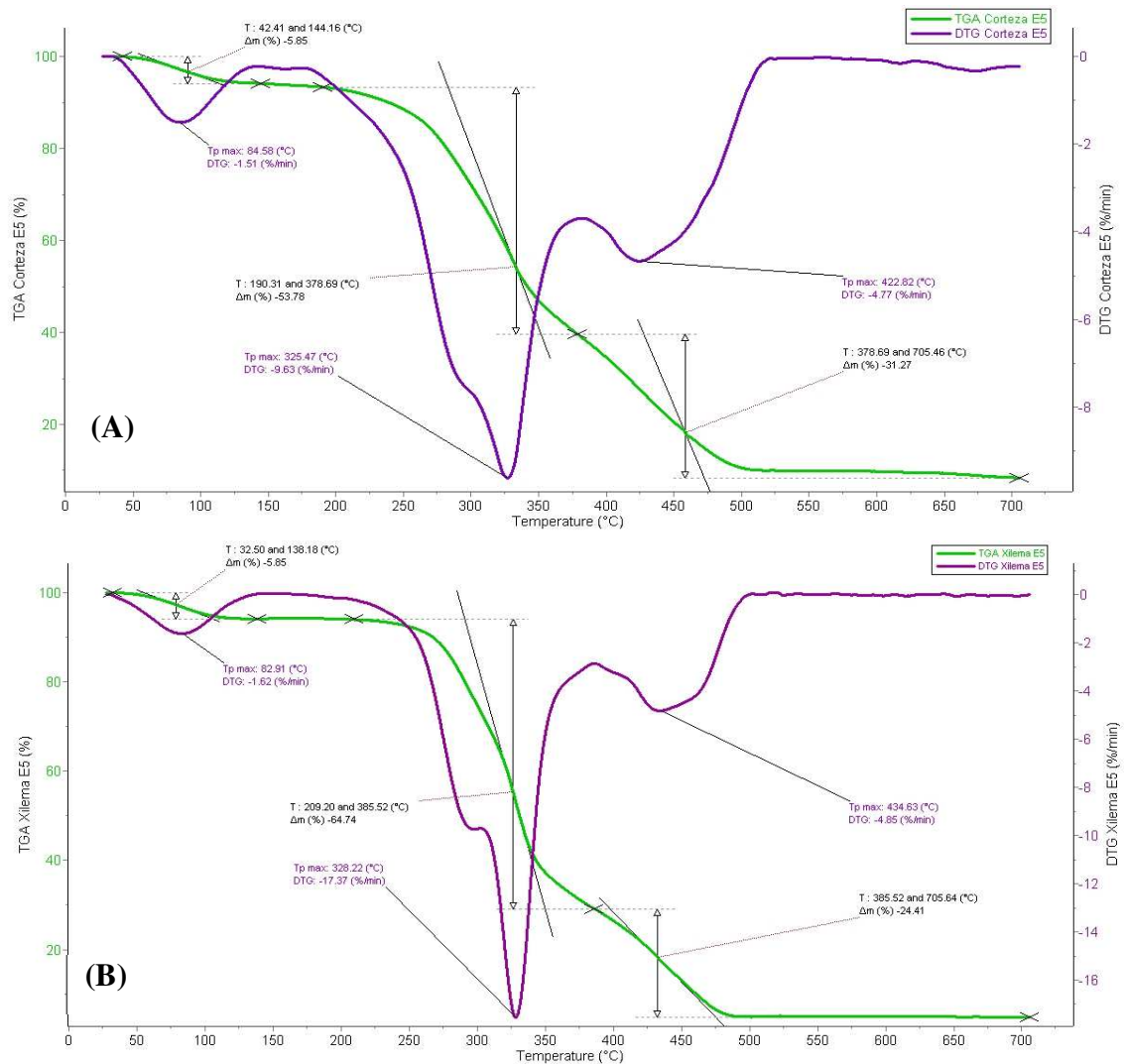


Figura 4. Análisis termogravimétrico (TGA) y análisis termogravimétrico diferencial (DTG) del proceso de combustión de *E. globulus*. El termograma incluye: (A) análisis de TGA y DTG para el T4 y (B) análisis de TGA y DTG para el T3

La **Figura 5A** muestra el perfil de TGA (análisis termogravimétrico) que ilustra la pérdida de masa, así como las principales entalpías del análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) durante el proceso de combustión de la corteza de 5 años de edad (T4). La primera transición endotérmica, que es bastante débil, se asocia principalmente con la evaporación del agua contenida en la muestra (30°C-140°C), requiriendo 30,81 Kcal/Kg. Esto se confirma con el perfil de TGA, donde se observa una pérdida de masa del 5,85%.

A partir de temperaturas superiores a 205°C, se inicia la deshidratación y descomposición de componentes de la madera como la celulosa y la lignina, generando varias

reacciones exotérmicas relacionadas con la liberación de gases durante la combustión. Se identificó un pico exotérmico principal a 451,70°C, y al integrar el área bajo la curva, se estimó una entalpía másica de 2121,87 Kcal/Kg para esta madera (Chávez-Guerrero & Hinojosa, 2010; Mejía, 2016).

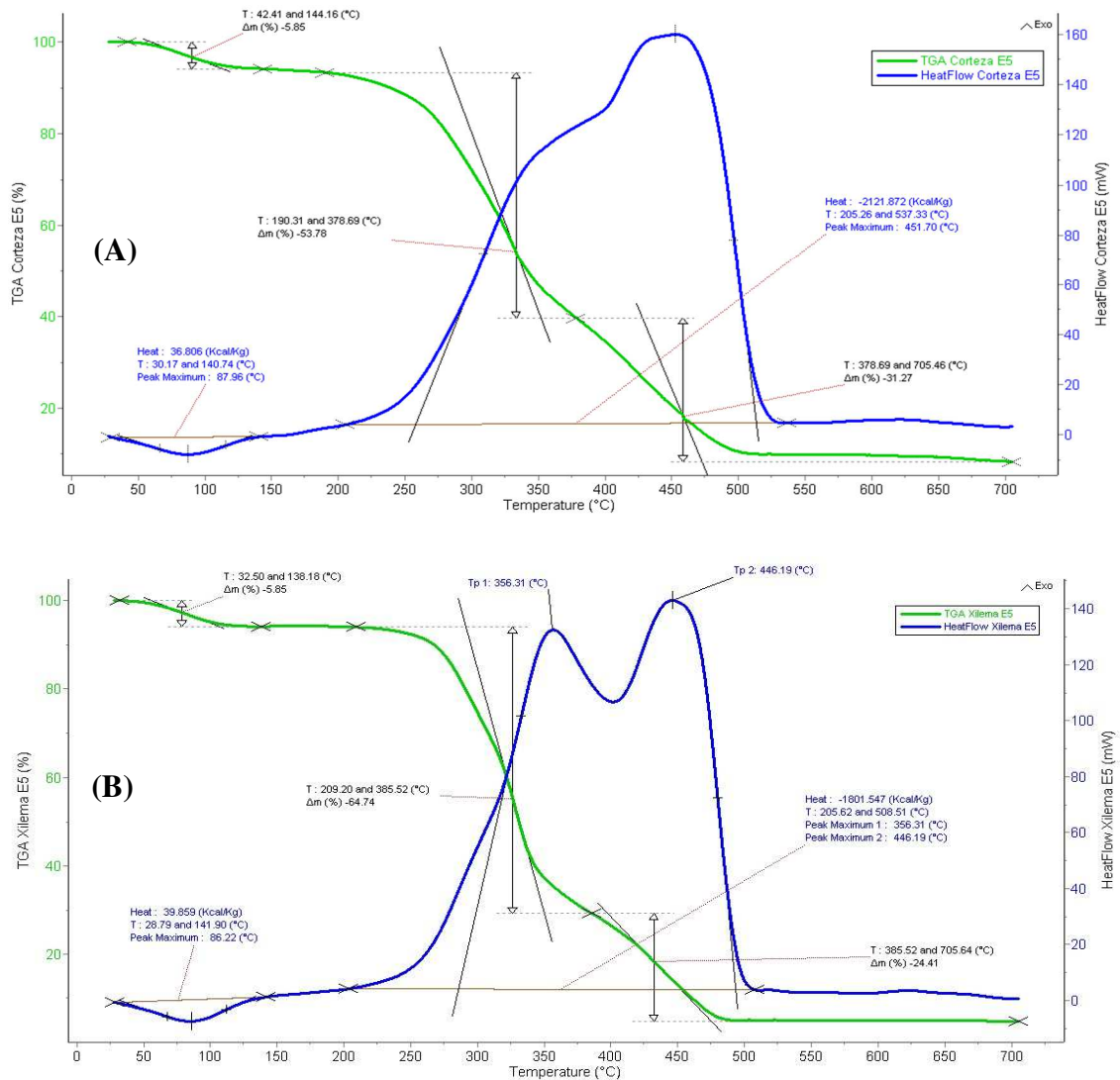


Figura 5. Análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) del proceso de combustión de *E. globulus*. El termograma incluye: (A) análisis de TGA y DSC para el T4 y (B) análisis de TGA y DSC para el T3

La **Figura 5B** muestra el perfil del análisis de calorimetría diferencial de barrido (DSC) para el xilema de 5 años (T3). La primera transición endotérmica, bastante débil, se atribuye principalmente a la evaporación del agua contenida en la muestra (28°C-141°C), requiriendo 39,89 Kcal/Kg. Este dato se confirma con el perfil del análisis termogravimétrico (TGA), que

muestra una pérdida de masa del 5,85% en esta región. A temperaturas superiores a 205°C, comienza la deshidratación y posterior descomposición de componentes de la madera como celulosa y lignina, dando lugar a varias reacciones exotérmicas, relacionadas con la liberación de gases durante la combustión. Se identificaron dos picos exotérmicos principales a 356,31 °C y 446,19°C, respectivamente. Al integrar el área bajo la curva, se estimó que la entalpía másica de esta madera fue de 1801,55 Kcal/Kg (Chávez-Guerrero & Hinojosa, 2010; Mejía, 2016).

V. CONCLUSIONES

1. El orden descendente del contenido de carbono fijo es el siguiente: $24,5 \pm 0,1\% > 23,9 \pm 0,4\% > 21,2 \pm 0,2\% > 17,8 \pm 0,2\% > 17,7 \pm 0,0\% > 17,1 \pm 0,3\%$, correspondientes a los tratamientos T6, T4, T2, T5, T3 y T1, respectivamente. En cuanto al contenido de material volátil, la clasificación descendente es: $72,0 \pm 0,0\% > 71,8 \pm 0,3\% > 70,1 \pm 0,2\% > 64,0 \pm 0,3\% > 63,4 \pm 0,2\% > 57,1 \pm 0,0\%$, correspondientes a los tratamientos T3, T5, T1, T2, T4 y T6, respectivamente. El porcentaje de ceniza más alto fue el T6 (corteza de ocho años) con $14,3 \pm 0,1\%$, mientras que el más bajo fue el T5 (xilema de ocho años) con $4,6 \pm 0,1\%$. El tratamiento con el menor contenido de humedad fue T4 (corteza de cinco años), con $3,7 \pm 0,1\%$, mientras que el de mayor contenido de humedad fue T2 (corteza de tres años), con $5,9 \pm 0,1\%$.
2. El poder calorífico superior, en orden descendente, es el siguiente: $2086,5 \pm 7,3 \text{ Kcal/Kg} > 2046,8 \pm 2,9 \text{ Kcal/Kg} > 2002,5 \pm 1,3 \text{ Kcal/Kg} > 1762,9 \pm 26,3 \text{ Kcal/Kg} > 1732,1 \pm 14,7 \text{ Kcal/Kg} > 1569,4 \pm 27,9 \text{ Kcal/Kg}$, correspondientes a los tratamientos T4, T6, T2, T3, T5 y T1, respectivamente. Por su parte, el poder calorífico inferior, también en orden descendente, se presenta de la siguiente manera: $1582,87 \pm 7,03 \text{ Kcal/Kg} > 1540,25 \pm 3,03 \text{ Kcal/Kg} > 1501,18 \pm 1,03 \text{ Kcal/Kg} > 1262,55 \pm 26,17 \text{ Kcal/Kg} > 1223,21 \pm 14,79 \text{ Kcal/Kg} > 1070,71 \pm 27,74 \text{ Kcal/Kg}$, correspondientes a los tratamientos T4, T6, T2, T3, T5 y T1, respectivamente.
3. El proceso de combustión de la corteza y el xilema de *E. globulus* de 5 años (T4 y T3, respectivamente) se caracteriza por tres etapas principales de degradación. La primera corresponde a la pérdida de humedad, con una temperatura entre 42 a 144°C para la corteza y 32 a 138°C para el xilema. La segunda etapa abarca la combustión activa de compuestos intermedios, como hemicelulosa, celulosa y lignina, entre 190 a 378°C para la corteza y 209 a 385°C para el xilema. Finalmente, la tercera etapa corresponde a la volatilización, con temperaturas superiores a 378°C para la corteza y 385°C para el xilema. En esta etapa, se liberan productos gaseosos y se observan reacciones exotérmicas. Además, la entalpía másica de la corteza fue de 2123,29 Kcal/Kg, mientras que para el xilema fue de 1802,75 Kcal/Kg, reflejando las diferencias en su composición y comportamiento durante la combustión.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

1. Desarrollar modelos cinéticos que describan y predigan el comportamiento de degradación térmica y el poder calorífico de la biomasa de *E. globulus* utilizando datos obtenidos mediante termogravimetría (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC).
2. Investigar cómo varían los compuestos primarios de la biomasa (celulosa, hemicelulosa, lignina) a lo largo de diferentes etapas de crecimiento de *E. globulus* y cómo estas variaciones afectan el poder calorífico.
3. Determinar y comparar el poder calorífico de diferentes productos de biomasa transformada, como biochar, carbón y briquetas, obtenidos a partir de *E. globulus*, para comprender su potencial como fuentes de energía.

VII. REFERENCIAS

- Açıklalın, K. (2012). Pyrolytic characteristics and kinetics of pistachio shell by thermo gravimetric analysis. *Journal of thermal analysis and calorimetry*, 109(1), 227-235.
- AENOR. (2009). *Combustibles sólidos recuperados. Determinación del contenido de humedad mediante secado en estufa. Parte 1: Humedad total. Método de referencia*. UNE-EN 14774-1:2009. <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une?c=N0045502>
- AENOR. (2010). *Combustibles sólidos recuperados. Determinación del comportamiento de combustión para la clasificación de los combustibles sólidos recuperados*. UNE-EN 15148:2010. <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une?c=N0045506>
- AENOR. (2010). *Combustibles sólidos recuperados. Determinación del contenido de cenizas*. UNE-EN 14775:2010. <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une?c=N0045504>
- AENOR. (2019). *Combustibles sólidos recuperados. Determinación del comportamiento de combustión para la clasificación de los combustibles sólidos recuperados*. UNE-EN 15148:2019. <https://www.aenor.com/normas-y-libros/buscador-de-normas/une?c=N0060580>
- Agostinho-Da Silva, D., Otomar-Caron, B., Sanquetta, C. R., Behling, A., Schmidt, D., Bamberg, R., ... & Dalla-Corte, A. P. (2014). Ecuaciones para estimar el poder calorífico de la madera de cuatro especies de árboles. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, 20(2), 177-186.
- Alberca, R. & Marco, J. J. (2019). Estudio de la Capacidad Calorífica de la Especie Forestal más Utilizada como Combustible en las Comunidades Campesinas de Piruro y San Miguel de Pangoray del Distrito de Lajas–Chota–Cajamarca.
- Andrés, D. (2008). *Física y Química. Pozuelo de Alarcón*. Madrid

- Angiosperm Phylogeny Group IV [APG IV]. (2017). Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants. <https://doi.org/10.15468/fzuaam>
- Apolinar-Hidalgo, F., Honorato-Salazar, J. A., & Colotl-Hernández, G. (2017). Caracterización energética de la madera de *Acacia pennatula* Schlt. & Cham. y *Trema micrantha* (L.) Blume. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 8(39), 71-82.
- Aranzazu-Ríos, L. M., Cárdenas-Muñoz, P. V., Cárdenas-Giraldo, J. M., Gaviria, G. H., Rojas González, A. F., & Carrero-Mantilla, J. I. (2013). Modelos cinéticos de degradación térmica de polímeros: una revisión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 12(23), 113-129.
- ASTM International. (2002). *Standard practice for proximate analysis of coal and coke*. ASTM D3172-89(02). <https://www.astm.org/Standards/D3172.htm>
- ASTM International. (2002). *Standard practice for proximate analysis of coal and coke*. ASTM D3172-89(02). <https://www.astm.org/Standards/D3172.htm>
- ASTM International. (2011). *Standard test method for moisture in the analysis sample of coal and coke*. ASTM D3173-11. <https://www.astm.org/d3173-11.html>
- ASTM International. (2011). *Standard test method for volatile matter in the analysis sample of coal and coke*. ASTM D3175-11. <https://www.astm.org/d3175-11.html>
- ASTM International. (2013). *Standard practice for proximate analysis of coal and coke*. ASTM D3172-13. <https://www.astm.org/Standards/D3172.htm>
- ASTM International. (2016). *Standard test methods for proximate analysis of coal and coke by macro thermogravimetric analysis*. ASTM D7582-16. <https://www.astm.org/Standards/D7582.htm>
- Arnold, E. M. (1998). *La Leña y el Carbón en los Países en Desarrollo*. Unasyva.

- Arnold, J. E. M., & Jongma, J. (1978). La leña y el carbón en los países en desarrollo. *América Latina*, 282(93), 66.
- Aylott, M. J., Casella, E., Tubby, I., Street, N. R., Smith, P., & Taylor, G. (2008). Yield and spatial supply of bioenergy poplar and willow short-rotation coppice in the UK. *New Phytologist*, 178(2), 358-370.
- Barrera-Calva, E., Martínez, G., Rosas-Cedillo, R., & Rentería-Tapia, V. (2021). Maderas de zonas áridas de México, poder calorífico por ATG-ATD y mediante bomba calorimétrica. *Madera y bosques*, 27(3).
- Barros, S. D. S., do Nascimento, C. C., & de Azevedo, C. P. (2012). Caracterização tecnológica da madeira de três espécies florestais cultivadas no Amazonas: alternativa para produção de lenha. *Floresta* 42(4): 725–732
- Basu, P. (2013). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press. Burlington, MA, USA. pp. 27-63
- Carbon Trust. (2009). Biomass heating: A practical guide for potential users. Indepth guide; CTG012. The Carbon Trust. London, UK. 90 p. https://www.carbontrust.com/media/31667/ctg012_biomass_heating.pdf (28 de octubre de 2016)
- Chávez-Guerrero, L., & Hinojosa, M. (2010). Bagasse from the mezcal industry as an alternative renewable energy produced in arid lands. *Fuel*, 89(12), 4049-4052.
- Cruz, B. B. & Simon, C. (2019). Poder calorífico de la madera de *Polylepis racemosa* R & P. y *Schinus molle* L. de dos procedencias [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú].
- Curo, I. (2019). Poder calorífico del carbón de madera de tres especies forestales-Distrito Mariscal Cáceres-Huancavelica [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú].

- Demirbas, A. (2004). Bioenergy, global warming, and environmental impacts. *Energy sources*, 26(3), 225-236.
- Díaz-Balteiro, L., Bertomeu, M., Giménez, J. C. (2008). Gestión óptima de *Eucalyptus globulus* en Galicia. Gestión óptima de *Eucalyptus globulus* en Galicia. III Congreso de la Asociación Hispano-Portuguesa de economía de los Recursos Naturales y Ambientales. Mallorca, 2008
- Eloy, E., da Silva, D. A., Caron, B. O., & de Souza, V. Q. (2015). Capacidade energética da madeira e da casca de acácia-negra em diferentes espaçamentos. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 35(82), 163-167.
- Farfán V., E., A. Sánchez V. y M. Moreno S. (1989). Estudio de cuatro especies de valor dendroenergético del Alto Balsas Poblano. In: Zavala C., F. (comp.). Memorias de la Primera Reunión Nacional Sobre Dendroenergía. 8 y 9 de noviembre de 1989. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de Méx., México. pp. 391-397
- Fernandez, B. M. (1986). *Gran Geografía del Perú. Naturaleza y hombre. La energía*. Atlas. Volumen VIII. Ed. Manfer. España. pp.301
- Fernández-López, A. B. (1985). Efecto del espaciamento inicial en la producción de *Eucalyptus globulus*. Departamento Forestal de Lourizán, 45 p. (inédito).
- Fredes-Núñez, N. A. (2014). Evaluación técnica y económica de una planta de producción de combustible sólido a partir de biomasa forestal en la región de Los Lagos.
- Godoy, P. C. (2022). Análisis del poder calorífico de *Eucalyptus globulus* y *Piptocoma discolor* para la elaboración de carbón en el cantón Guano, provincia de Chimborazo.
- González-Río, F., Castellanos, A., Fernández, O., Astorga, R., Gómez, C. (1997). El Cultivo del Eucalipto. Manual práctico del selvicultor. 94 p. KRK Ediciones. Oviedo.
- Guimaraes, M., Aguielio, P., & Batista, J. (1982). *Propriedades Controle de Qualidade do Carvão Vegetal*. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, Belo Horizonte.

- Hinostroza, C. (1994). Determinación del poder calorífico de tres especies de *Eucalyptus* del valle del Mantaro [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú].
- Jameel, H., D. R. Keshwani, S. F. Carter and T. H. Treasure. (2010). Thermochemical conversion of biomass to power and fuels. *In*: Cheng, J. (ed.). Biomass to renewable energy processes. Taylor and Francis Group, LLC, Boca Raton, FL, USA. pp. 437-489
- Kumar, R., Pandey, K. K., Chandrashekar, N., & Mohan, S. (2011). Study of age and height wise variability on calorific value and other fuel properties of *Eucalyptus hybrid*, *Acacia auriculaeformis* and *Casuarina equisetifolia*. *Biomass and Bioenergy*, 35(3), 1339-1344.
- Lopes, F. C. R., & Tannous, K. (2022). Coconut fiber pyrolysis: specific heat capacity and enthalpy of reaction through thermogravimetry and differential scanning calorimetry: 504527. *Thermochimica Acta*, 707, 179087.
- Lapuerta, M., Hernández, J. J., & Rodríguez, J. (2004). Kinetics of devolatilisation of forestry wastes from thermogravimetric analysis. *Biomass and Bioenergy*, 27(4), 385-391.
- Mandal, S., Mohalik, N. K., Ray, S. K., Khan, A. M., Mishra, D., & Pandey, J. K. (2022). A comparative kinetic study between TGA & DSC techniques using model-free and model-based analyses to assess spontaneous combustion propensity of Indian coals. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 1113-1126.
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource technology*, 83(1), 37-46.
- Mejía, P. N. (2016). Potencial biomásico y propiedades energéticas de cuatro especies del bosque seco de Honduras. *TATASCAN Revista Técnica Científica*, 26(1), 17-25.
- MINAM. (2014). Protocolo: Evaluación de la Exactitud Temática del Mapa de Deforestación. Dirección General de Ordenamiento Territorial-Lima: Ministerio del Ambiente. 32 p.
- Navickis, R. (1978). Biomass. *Science News*, 258-259.

- Ngangyo-Heya, M., Foroughbahchk-Pournavab, R., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Zelinski, V., & Pintor-Ibarra, L. F. (2016). Calorific value and chemical composition of five semi-arid Mexican tree species. *Forests*, 7(3), 58.
- Olade, G. (1987). *Manual del Curso Degasificación de la Madera en Centro América y El Caribe*. Quito - Ecuador.
- Paiva, J. (1997). *Eucalyptus globulus* Labill. (Real Jardín Botánico) Castroviejo et al. (eds.), Flora ibérica. 8. 80 pp.
- Gomez-Mendoza, F. M. (2022). Composición Química y Poder Calorífico de la Madera de *Mezilaurus itauba* (Meisn.) Taub. ex Mez y *Anacardium Giganteum* W. Hancock ex Engl., Provenientes de la concesión Forestal Mendoza-Pucallpa [Tesis de grado, Universidad Nacional del Centro del Perú].
- Rincón-Rincón, S. N., & González-Castillo, Y. A. (2014). Estudio de factibilidad para la fabricación de pellets a partir de material lignocelulósico proveniente de palma de aceite.
- Ríos, J. C., Rubilar, R., Cancino, J., Acuña, E., Corral, J. J. & Rosales, R. (2018). Densidad básica de la madera y poder calorífico en vástagos de tres cultivos dendroenergéticos. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(47), 253-272.
- Rodríguez-Romero, L. A., Gutiérrez-Antonio, C., García-Trejo, J. F., & Feregrino-Pérez, A. A. (2022). Estudio comparativo de modelos matemáticos para predecir el poder calorífico de residuos agrícolas mexicanos. *TecnoLógicas*, 25(53).
- Santos, J. M. (2020). *Determinación del poder calorífico de tres especies de coníferas de bosque templado de México Pinus cooperi C. Blanco, Pinus durangensis Ehren y Pinus engelmannii Carr* [Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León].

VIII. ANEXO

Anexo A. Análisis de varianza de las medias de las fuentes de variación

Tabla 10. Análisis de varianza (ANVA) para el contenido de humedad

Fuente de variación	SC	GL	CM	FC	SIG
Edad del brote (A)	3,48	2	1,74	75,61	**
Tipo de biomasa (B)	3,80	1	3,80	164,96	**
A*B	5,10	2	2,55	110,71	**
Error experimental	0,28	12	0,02		
Total	12,66	17			

SC: Suma de cuadrados, GL: Grados de libertad, CM: Cuadrado medio, FC: F-calculado, SIG: Significancia, **: Altamente significativa

Tabla 11. ANVA para el material volátil

Fuente de variación	SC	GL	CM	FC	SIG
Edad del brote (A)	3,48	2	1,74	75,61	**
Tipo de biomasa (B)	3,80	1	3,80	164,96	**
A*B	5,10	2	2,55	110,71	**
Error experimental	0,28	12	0,02		
Total	12,66	17			

SC: Suma de cuadrados, GL: Grados de libertad, CM: Cuadrado medio, FC: F-calculado, SIG: Significancia, **: Altamente significativa

Tabla 12. ANVA para el contenido cenizas

Fuente de variación	SC	GL	CM	FC	SIG
Edad del brote (A)	17,43	2	8,71	80,72	**
Tipo de biomasa (B)	115,05	1	115,05	1065,67	**
A*B	53,81	2	26,91	249,22	**
Error experimental	1,30	12	0,11		
Total	187,59	17			

SC: Suma de cuadrados, GL: Grados de libertad, CM: Cuadrado medio, FC: F-calculado, SIG: Significancia, **: Altamente significativa

Tabla 13. ANVA para el contenido de carbono fijo

Fuente de variación	SC	GL	CM	FC	SIG
Edad del brote (A)	13,04	2	6,52	39,81	**
Tipo de biomasa (B)	144,56	1	144,56	882,79	**
A*B	5,73	2	2,86	17,48	**
Error experimental	1,97	12	0,16		
Total	165,29	17			

SC: Suma de cuadrados, GL: Grados de libertad, CM: Cuadrado medio, FC: F-calculado, SIG: Significancia, **: Altamente significativa

Tabla 14. ANVA para el poder calorífico superior

Fuente de variación	SC	GL	CM	FC	SIG
Edad del brote (A)	62407,49	2	31203,74	35,70	**
Tipo de biomasa (B)	574001,48	1	574001,48	656,65	**
A*B	13039,53	2	6519,76	7,46	**
Error experimental	10489,69	12	874,14		
Total	659938,18	17			

SC: Suma de cuadrados, GL: Grados de libertad, CM: Cuadrado medio, FC: F-calculado, SIG: Significancia, **: Altamente significativa

Tabla 15. ANVA para el poder calorífico inferior

Fuente de variación	SC	GL	CM	FC	SIG
Edad del brote (A)	66627,41	2	33313,70	37,81	**
Tipo de biomasa (B)	581127,17	1	581127,17	659,49	**
A*B	13113,02	2	6556,51	7,44	**
Error experimental	10574,07	12	881,17		
Total	671441,66	17			

SC: Suma de cuadrados, GL: Grados de libertad, CM: Cuadrado medio, FC: F-calculado, SIG: Significancia, **: Altamente significativa

Anexo B. Panel fotográfico del proceso de ejecución del trabajo



Figura 6. Recolección de xilema y corteza usando barreno de pressler



Figura 7. Muestra de xilema en proceso de oreado



Figura 8. Muestras frescas de xilema codificadas y embaladas en sorbetes de plástico



Figura 9. Muestra de xilema en proceso de secado en estufa



Figura 10. Proceso de molienda de la corteza y xilema del *E. globulus*

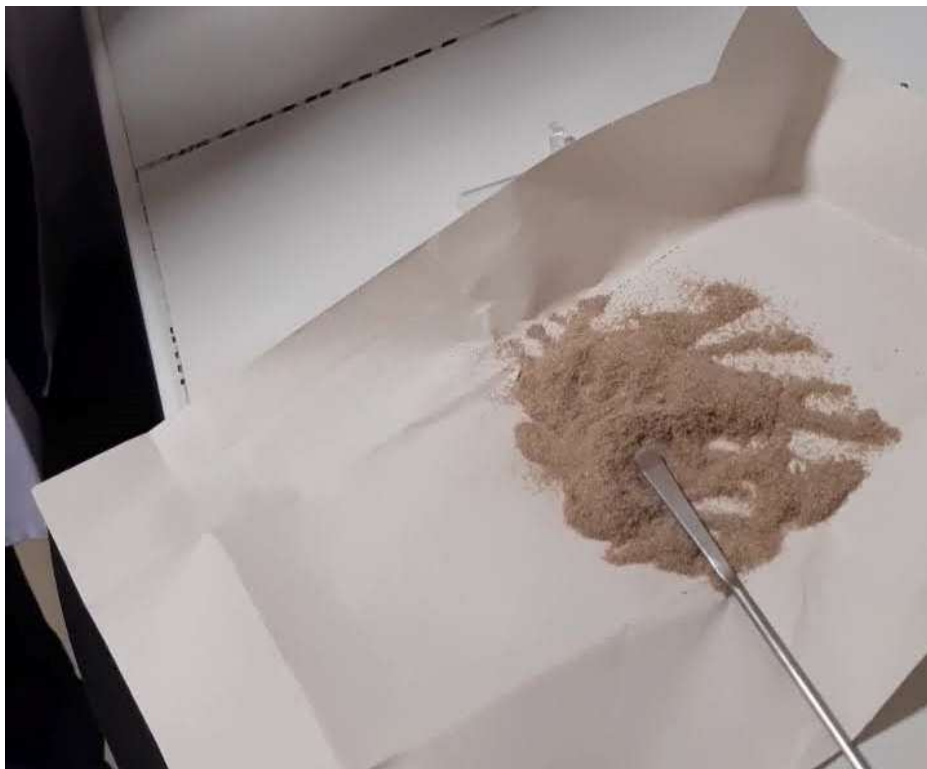


Figura 11. Muestra molida de xilema seca a la humedad de equilibrio de la zona

Anexo C. Resultados de análisis termogravimétrico (TGA) en el proceso pirolítico



RESULTADOS DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	06/11/2023 Hora: 11:00 a.m.
Solicitante	Calero Reyes Keiko Mireille
Tipo de muestra	Madera
Código	Corteza E3
Cantidad muestra	3.5 g
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	0028237/0028616
Observaciones	• Análisis TGA (pirólisis)

2. Programación del experimento

Calorímetro	Labsys Evo Robot – gas option TGA-DSC 1600 °C
Marca	SETARAM (Francia)
Calibración	Indio y Aluminio (99.999%)
Nombre del experimento	Corteza E3
Nombre genérico	Experimento 2
Peso de la muestra	10 ± 0.5 mg
Tipo de crisol	Alúmina 100 µL

3. Rampas de calentamiento

Zona estándar	Rango de temperatura	Velocidad de escaneo	Tiempo	Flujo del gas	Gas usado
Estabilización	25°C – 25°C	-----	30 min	50 mL/min	Argón
Calentamiento I	25°C – 700°C	10 °C/min	-----	50 mL/min	Argón
Enfriamiento	700°C – 30°C	20 °C/min	-----	50 mL/min	Argón

Ing. Trujillo Ccanahuire, José L.
Especialista Área de Calorimetría

Dr. Soria Iturri, Melchor
Director del Laboratorio Central de Investigación - UNAS



4. Transiciones detectadas:

4.1. Análisis termogravimétrico (Pirólisis) de Corteza E3

Zonas Detectadas	Repeticiones	Rango de Temperatura		ΔT °C	Tp° máxima Degradación (°C)	Velocidad de pérdida (%/min)	Δm (%)
		Ti (°C)	Tf (°C)	(Tf - Ti)			
Zona 1	R1	36.93	140.99	104.06	85.26	1.264	5.769
	R2	36.87	140.62	103.75	86.23	1.407	5.998
	R3	36.22	140.03	103.81	86.94	1.329	5.871
Zona 2	R1	190.16	407.51	217.35	350.67	9.528	53.095
	R2	190.09	407.52	217.43	350.45	8.947	51.699
	R3	190.14	408.24	218.1	350.82	9.188	52.446
Zona 3	R1	407.51	701.72	294.21	-	-	11.429
	R2	407.52	702.73	295.21	-	-	11.775
	R3	408.24	702.73	294.49	-	-	11.555

Ti : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; Δm : variación de masa

4.2. Análisis complementario de la Pirólisis en Corteza E3

Muestra	Repeticiones	% Humedad (UNE-EN 14774-1)	% Material Volátil (UNE-EN 15148)
Corteza E3	R1	5.77	64.52
	R2	6.00	63.47
	R3	5.87	64.00

4.3. Determinación de Carbono Fijo en Corteza E3

Análisis	Repeticiones	Δm (%)
Carbono Fijo	R1	20.91
	R2	21.46
	R3	21.28

$$\% \text{ Carbono Fijo} = 100 - (\%H + \%MV + \%C)$$

Donde:

- %H: Humedad
- %MV: Material volátil
- %C: Ceniza

5. Termogramas del Análisis TGA

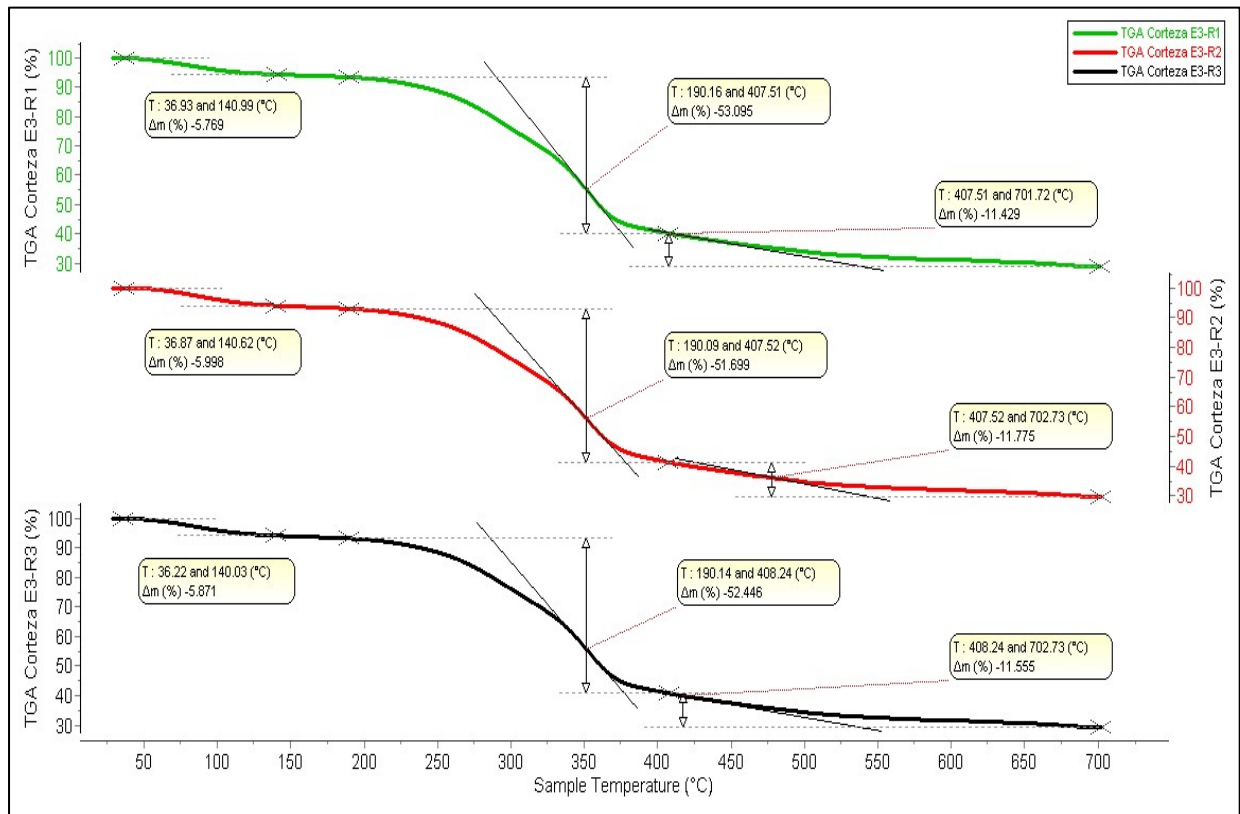


Figura 1. Termogramas TGA de pirólisis en Corteza E3

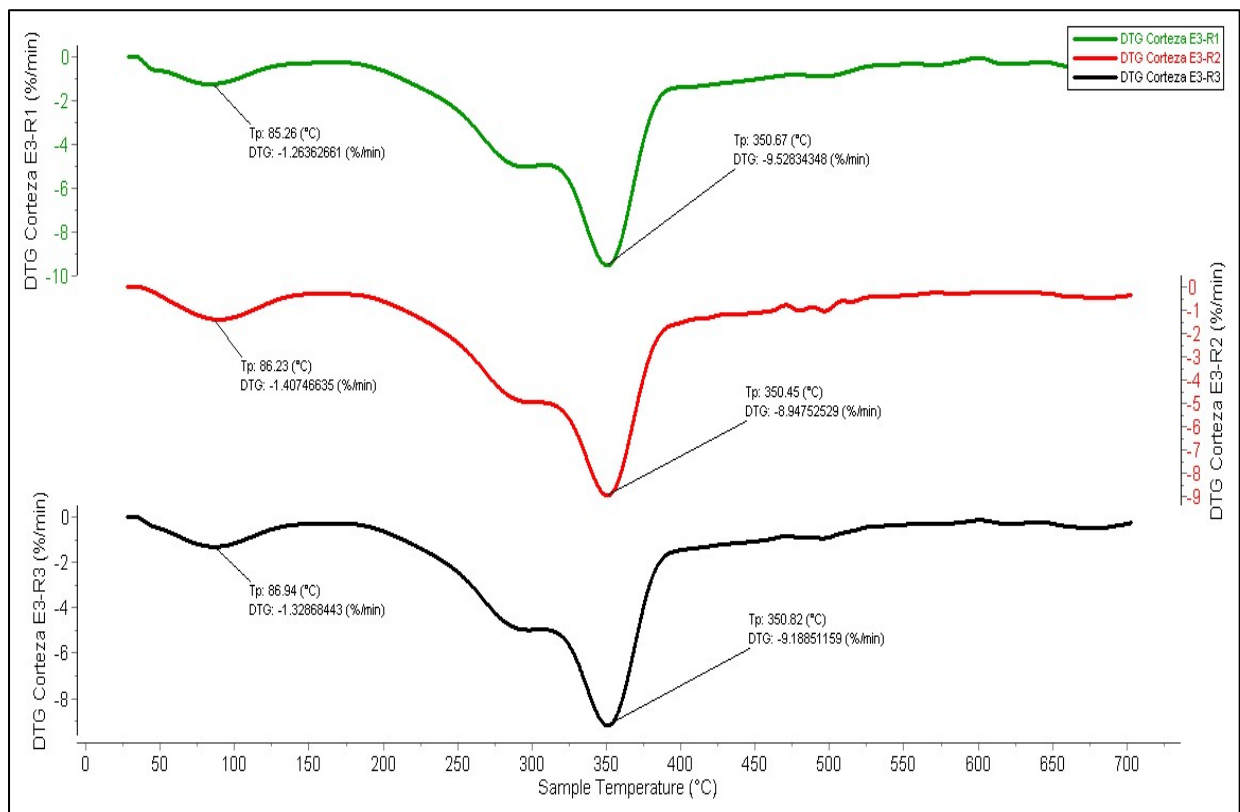


Figura 2. Termogramas DTG de pirólisis en Corteza E3



RESULTADOS DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	06/11/2023 Hora: 11:00 a.m.
Solicitante	Calero Reyes Keiko Mireille
Tipo de muestra	Madera
Código	Corteza E5
Cantidad muestra	3.0 g
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	0028237/0028616
Observaciones	• Análisis TGA (pirólisis)

2. Programación del experimento

Calorímetro	Labsys Evo Robot – gas option TGA-DSC 1600 °C
Marca	SETARAM (Francia)
Calibración	Indio y Aluminio (99.999%)
Nombre del experimento	Corteza E5
Nombre genérico	Experimento 2
Peso de la muestra	10 ± 1.0 mg
Tipo de crisol	Alúmina 100 µL

3. Rampas de calentamiento

Zona estándar	Rango de temperatura	Velocidad de escaneo	Tiempo	Flujo del gas	Gas usado
Estabilización	25°C – 25°C	-----	30 min	50 mL/min	Argón
Calentamiento I	25°C – 700°C	10 °C/min	-----	50 mL/min	Argón
Enfriamiento	700°C – 30°C	20 °C/min	-----	50 mL/min	Argón

Ing. Trujillo Ccanahuire, José L.
Especialista Área de Calorimetría

Dr. Soria Iturri, Melchor
Director del Laboratorio Central de Investigación - UNAS



4. Transiciones detectadas:

4.1. Análisis termogravimétrico (Pirólisis) de Corteza E5

Zonas Detectadas	Repeticiones	Rango de Temperatura		ΔT °C	Tp° máxima Degradación (°C)	Velocidad de pérdida (%/min)	Δm (%)
		Ti (°C)	Tf (°C)	(Tf - Ti)			
Zona 1	R1	28.15	133.99	105.84	83.23	0.840	3.795
	R2	28.75	133.28	104.53	83.36	1.047	3.770
	R3	28.46	134.28	105.82	83.30	0.946	3.484
Zona 2	R1	180.01	408.59	228.58	350.60	8.279	51.686
	R2	180.11	408.02	227.91	354.46	9.278	51.654
	R3	180.13	408.77	228.64	353.28	8.779	51.307
Zona 3	R1	408.59	700.77	292.18	-	-	11.921
	R2	408.02	704.47	296.45	-	-	11.783
	R3	408.77	703.94	295.17	-	-	11.732

Ti : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; Δm : variación de masa

4.2. Análisis complementario de la Pirólisis en Corteza E5

Muestra	Repeticiones	% Humedad (UNE-EN 14774-1)	% Material Volátil (UNE-EN 15148)
Corteza E5	R1	3.80	63.61
	R2	3.77	63.44
	R3	3.48	63.04

4.3. Determinación de Carbono Fijo en Corteza E5

Análisis	Repeticiones	Δm (%)
Carbono Fijo	R1	23.11
	R2	24.07
	R3	24.38

$$\% \text{ Carbono Fijo} = 100 - (\%H + \%MV + \%C)$$

Donde:

- %H: Humedad
- %MV: Material volátil
- %C: Ceniza

5. Termogramas del Análisis TGA

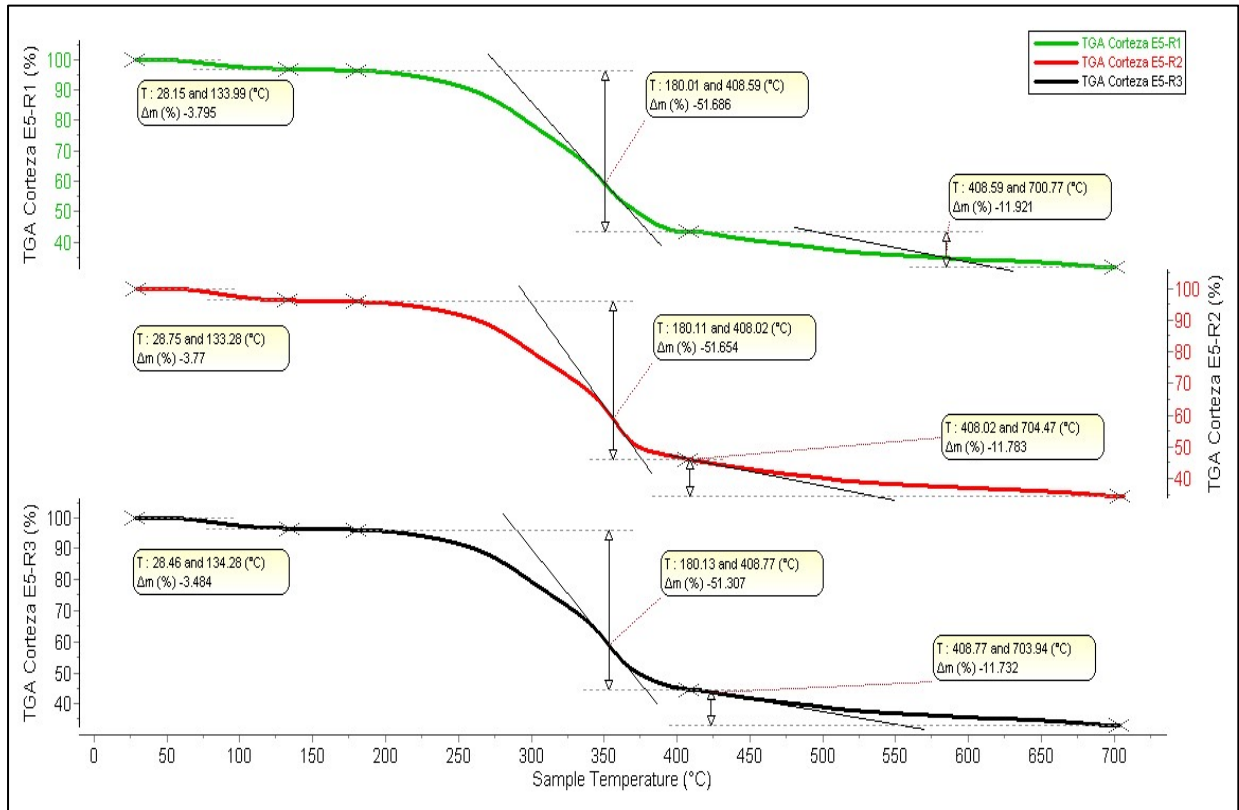


Figura 1. Termogramas TGA de pirólisis en corteza E5

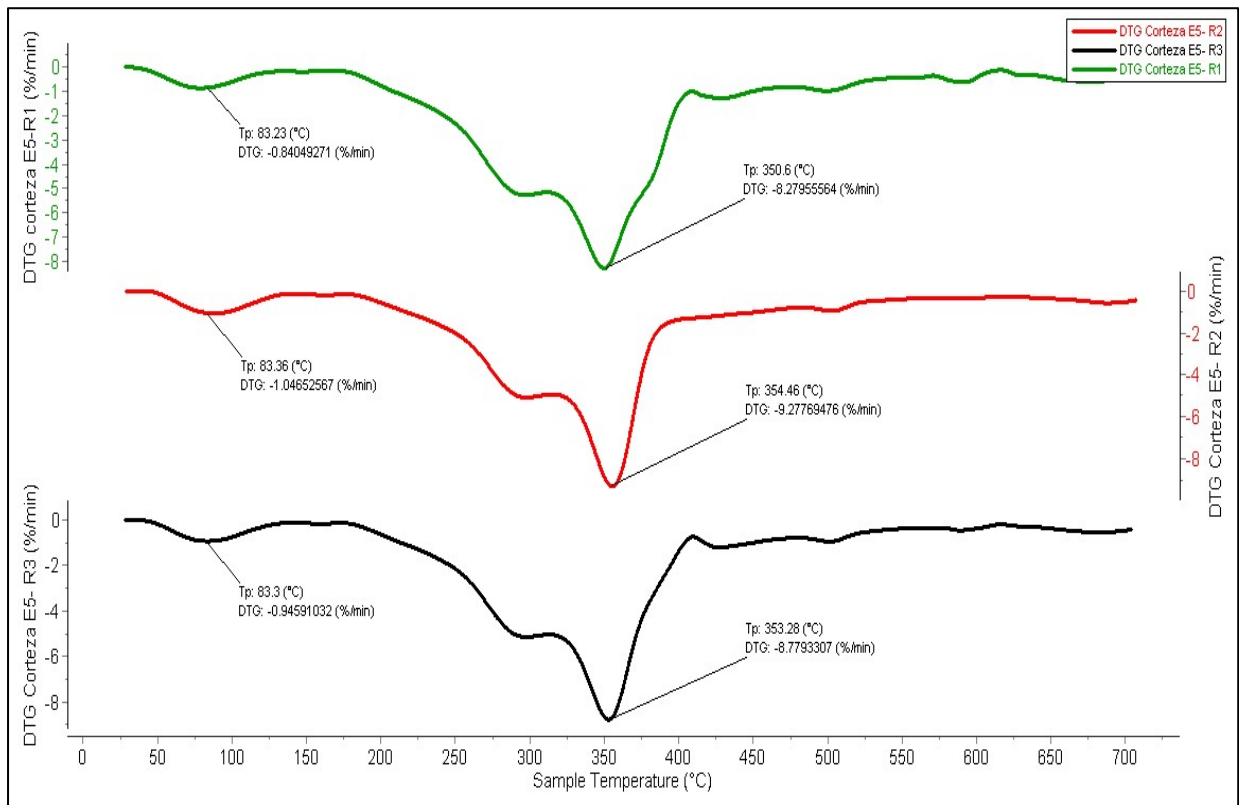


Figura 2. Termogramas DTG de pirólisis en corteza E5



RESULTADOS DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	06/11/2023 Hora: 11:00 a.m.
Solicitante	Calero Reyes Keiko Mireille
Tipo de muestra	Madera
Código	Corteza E8
Cantidad muestra	3.0 g
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	0028237/0028616
Observaciones	• Análisis TGA (pirólisis)

2. Programación del experimento

Calorímetro	Labsys Evo Robot – gas option TGA-DSC 1600 °C
Marca	SETARAM (Francia)
Calibración	Indio y Aluminio (99.999%)
Nombre del experimento	Corteza E8
Nombre genérico	Experimento 2
Peso de la muestra	10 ± 1.0 mg
Tipo de crisol	Alúmina 100 µL

3. Rampas de calentamiento

Zona estándar	Rango de temperatura	Velocidad de escaneo	Tiempo	Flujo del gas	Gas usado
Estabilización	25°C – 25°C	-----	30 min	50 mL/min	Argón
Calentamiento I	25°C – 700°C	10 °C/min	-----	50 mL/min	Argón
Enfriamiento	700°C – 30°C	20 °C/min	-----	50 mL/min	Argón

Ing. Trujillo Ccanahuire, José L.
Especialista Área de Calorimetría

Dr. Soria Iturri, Melchor
Director del Laboratorio Central de Investigación - UNAS



4. Transiciones detectadas:

4.1. Análisis termogravimétrico (Pirólisis) de Corteza E8

Zonas Detectadas	Repeticiones	Rango de Temperatura		ΔT °C (Tf - Ti)	Tp° máxima Degradación (°C)	Velocidad de pérdida (%/min)	Δm (%)
		Ti (°C)	Tf (°C)				
Zona 1	R1	28.43	135.03	106.6	82.52	0.949	4.074
	R2	28.31	135.04	106.73	84.29	1.094	4.191
	R3	28.14	135.93	107.79	84.27	1.025	4.046
Zona 2	R1	135.03	184.65	49.62	159.24	0.389	1.025
	R2	135.04	184.35	49.31	164.18	0.541	1.156
	R3	135.93	184.01	48.08	164.92	0.447	1.032
Zona 3	R1	184.65	400.20	215.55	352.77	8.139	46.573
	R2	184.35	400.58	216.23	352.77	7.734	46.044
	R3	184.01	400.60	216.59	353.11	8.046	46.314
Zona 4	R1	400.20	701.98	301.78	502.78	1.090	9.451
	R2	400.58	701.27	300.69	501.61	1.292	9.940
	R3	400.60	701.77	301.17	502.10	1.183	9.800

Ti : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; Δm : variación de masa

4.2. Análisis complementario de la Pirólisis en Corteza E8

Muestra	Repeticiones	% Humedad (UNE-EN 14774-1)	% Material Volátil (UNE-EN 15148)
Corteza E8	R1	4.07	57.05
	R2	4.19	57.14
	R3	4.05	57.15

4.3. Determinación de Carbono Fijo en Corteza E8

Análisis	Repeticiones	Δm (%)
Carbono Fijo	R1	24.53
	R2	24.29
	R3	24.63

$$\% \text{ Carbono Fijo} = 100 - (\%H + \%MV + \%C)$$

Donde:

- %H: Humedad
- %MV: Material volátil
- %C: Ceniza

5. Termogramas del Análisis TGA

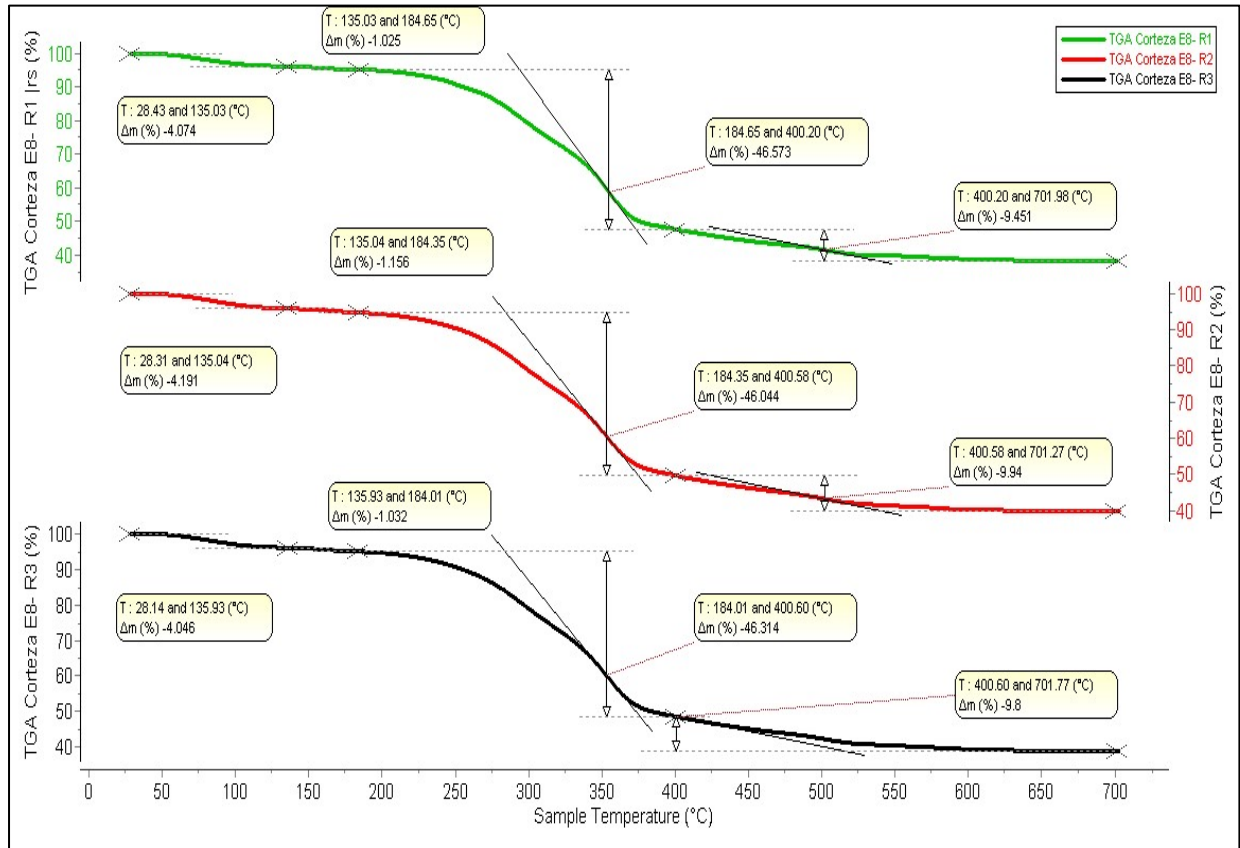


Figura 1. Termogramas TGA de pirólisis en corteza E8

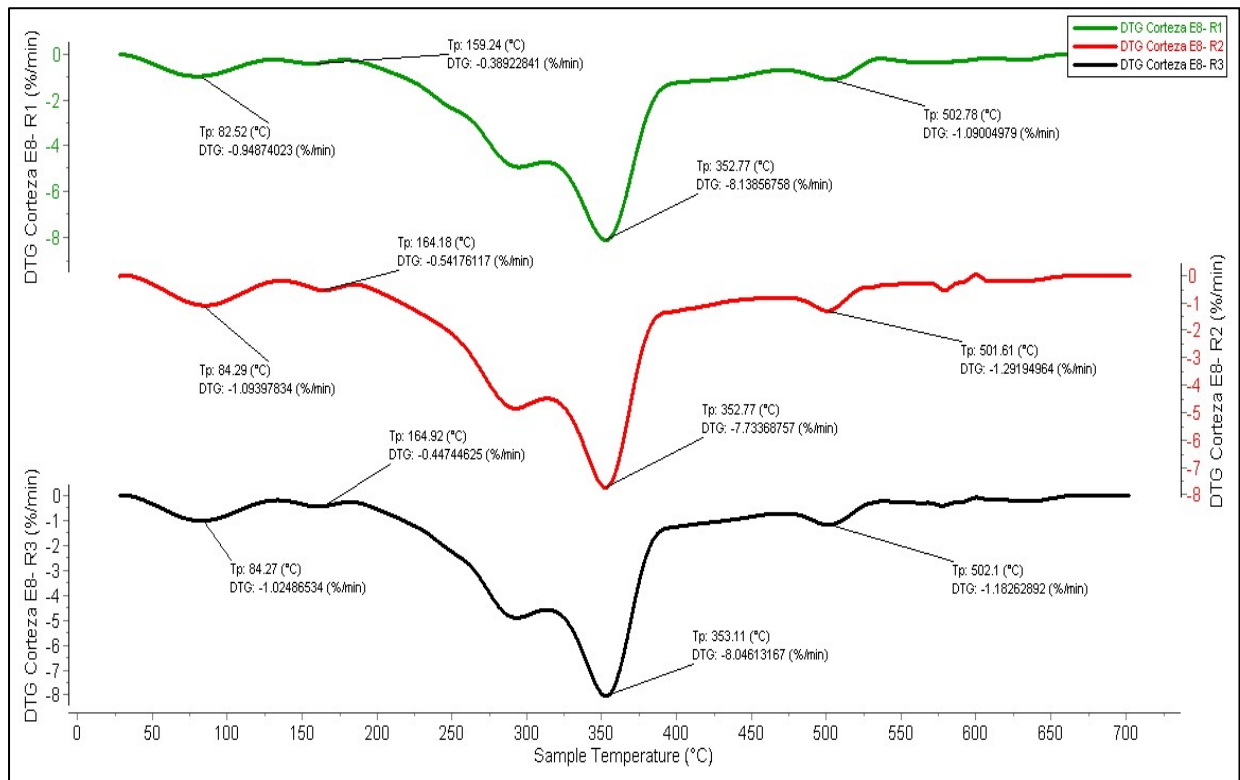


Figura 2. Termogramas DTG de pirólisis en corteza E8



RESULTADOS DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	06/11/2023 Hora: 11:00 a.m.
Solicitante	Calero Reyes Keiko Mireille
Tipo de muestra	Madera
Código	Xilema E3
Cantidad muestra	3.0 g
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	0028237/0028616
Observaciones	• Análisis TGA (pirólisis)

2. Programación del experimento

Calorímetro	Labsys Evo Robot – gas option TGA-DSC 1600 °C
Marca	SETARAM (Francia)
Calibración	Indio y Aluminio (99.999%)
Nombre del experimento	Xilema E3
Nombre genérico	Experimento 2
Peso de la muestra	10 ± 0.5 mg
Tipo de crisol	Alúmina 100 µL

3. Rampas de calentamiento

Zona estándar	Rango de temperatura	Velocidad de escaneo	Tiempo	Flujo del gas	Gas usado
Estabilización	25°C – 25°C	-----	30 min	50 mL/min	Argón
Calentamiento I	25°C – 700°C	10 °C/min	-----	50 mL/min	Argón
Enfriamiento	700°C – 30°C	20 °C/min	-----	50 mL/min	Argón

Ing. Trujillo Ccanahuire, José L.
Especialista Área de Calorimetría

Dr. Soria Iturri, Melchor
Director del Laboratorio Central de
Investigación - UNAS



4. Transiciones detectadas:

4.1. Análisis termogravimétrico (Pirolisis) de Xilema E3

Zonas Detectadas	Repeticiones	Rango de Temperatura		ΔT °C	Tp° máxima Degradación (°C)	Velocidad de pérdida (%/min)	Δm (%)
		Ti (°C)	Tf (°C)	(Tf - Ti)			
Zona 1	R1	28.47	144.11	115.64	87.73	1.531	5.426
	R2	28.89	144.75	115.86	88.54	1.360	5.371
	R3	28.73	144.03	115.3	88.69	1.444	5.079
Zona 2	R1	214.86	406.57	191.71	364.77	13.934	62.775
	R2	214.80	406.23	191.43	364.32	14.210	62.876
	R3	214.74	406.64	191.9	364.37	14.069	62.839
Zona 3	R1	406.57	705.69	299.12	-	-	7.637
	R2	406.23	705.44	299.21	-	-	6.858
	R3	406.64	704.84	298.2	-	-	7.218

Ti : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; Δm : variación de masa

4.2. Análisis complementario de la Pirolisis en Xilema E3

Muestra	Repeticiones	% Humedad (UNE-EN 14774-1)	% Material Volátil (UNE-EN 15148)
Xilema E3	R1	5.43	70.41
	R2	5.37	69.73
	R3	5.08	70.06

4.3. Determinación de Carbono Fijo en Xilema E3

Análisis	Repeticiones	Δm (%)
Carbono Fijo	R1	17.09
	R2	16.59
	R3	17.66

$$\% \text{ Carbono Fijo} = 100 - (\%H + \%MV + \%C)$$

Donde:

- %H: Humedad
- %MV: Material volátil
- %C: Ceniza

5. Termogramas del Análisis TGA

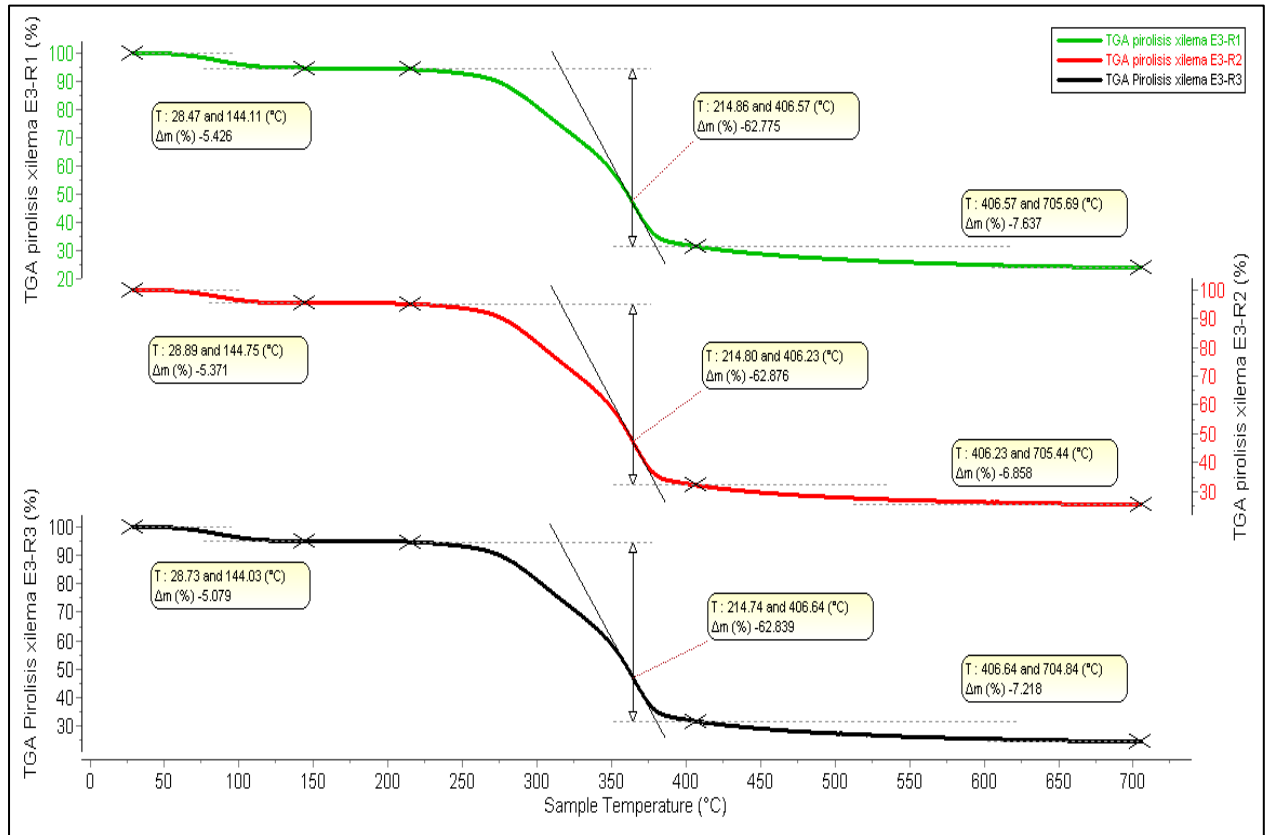


Figura 1. Termogramas TGA de pirolisis en Xilema E3

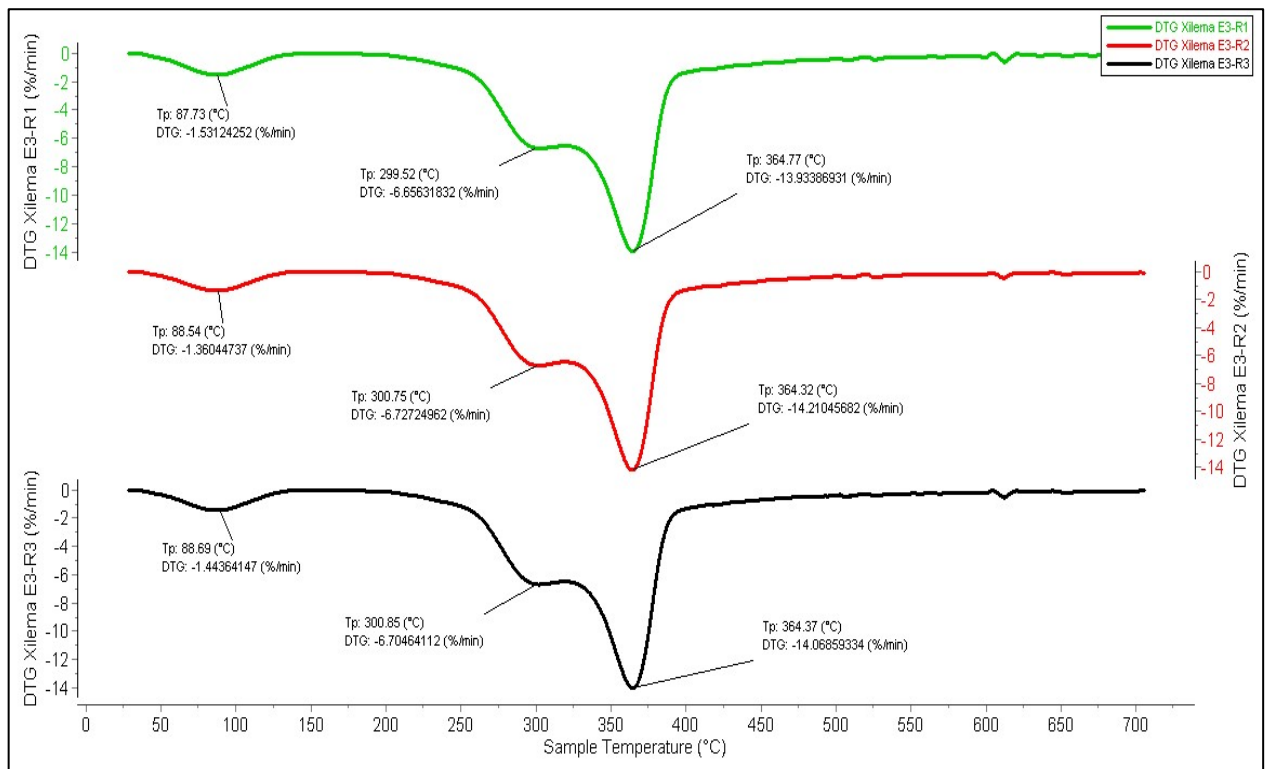


Figura 2. Termogramas DTG de pirolisis en Xilema E3



RESULTADOS DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	06/11/2023 Hora: 11:00 a.m.
Solicitante	Calero Reyes Keiko Mireille
Tipo de muestra	Madera
Código	Xilema E5
Cantidad muestra	3.0 g
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	0028237/0028616
Observaciones	• Análisis TGA (pirólisis)

2. Programación del experimento

Calorímetro	Labsys Evo Robot – gas option TGA-DSC 1600 °C
Marca	SETARAM (Francia)
Calibración	Indio y Aluminio (99.999%)
Nombre del experimento	Xilema E5
Nombre genérico	Experimento 2
Peso de la muestra	10 ± 0.5 mg
Tipo de crisol	Alúmina 100 µL

3. Rampas de calentamiento

Zona estándar	Rango de temperatura	Velocidad de escaneo	Tiempo	Flujo del gas	Gas usado
Estabilización	25°C – 25°C	-----	30 min	50 mL/min	Argón
Calentamiento I	25°C – 700°C	10 °C/min	-----	50 mL/min	Argón
Enfriamiento	700°C – 30°C	20 °C/min	-----	50 mL/min	Argón

Ing. Trujillo Ccanahuire, José L.
Especialista Área de Calorimetría

Dr. Soria Iturri, Melchor
Director del Laboratorio Central de Investigación - UNAS



4. Transiciones detectadas:

4.1. Análisis termogravimétrico (Pirolisis) de Xilema E5

Zonas Detectadas	Repeticiones	Rango de Temperatura		ΔT °C	Tp° máxima Degradación (°C)	Velocidad de pérdida (%/min)	Δm (%)
		Ti (°C)	Tf (°C)	(Tf - Ti)			
Zona 1	R1	28.77	151.50	122.73	83.08	1.488	5.491
	R2	28.29	151.01	122.72	83.32	1.377	5.206
	R3	28.78	151.70	122.92	83.67	1.437	5.349
Zona 2	R1	200.15	409.01	208.86	364.24	14.524	65.049
	R2	200.81	409.11	208.3	365.49	14.633	65.066
	R3	200.69	409.68	208.99	365.33	14.697	65.101
Zona 3	R1	409.01	707.36	298.35	-	-	6.865
	R2	409.11	707.42	298.31	-	-	6.985
	R3	409.68	707.39	297.71	-	-	6.880

Ti : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; Δm : variación de masa

4.2. Análisis complementario de la Pirolisis en Xilema E5

Muestra	Repeticiones	% Humedad (UNE-EN 14774-1)	% Material Volátil (UNE-EN 15148)
Xilema E5	R1	5.49	71.91
	R2	5.21	72.05
	R3	5.35	71.98

4.3. Determinación de Carbono Fijo en Xilema E5

Análisis	Repeticiones	Δm (%)
Carbono Fijo	R1	17.66
	R2	17.69
	R3	17.67

$$\% \text{ Carbono Fijo} = 100 - (\%H + \%MV + \%C)$$

Donde:

- %H: Humedad
- %MV: Material volátil
- %C: Ceniza

5. Termogramas del Análisis TGA

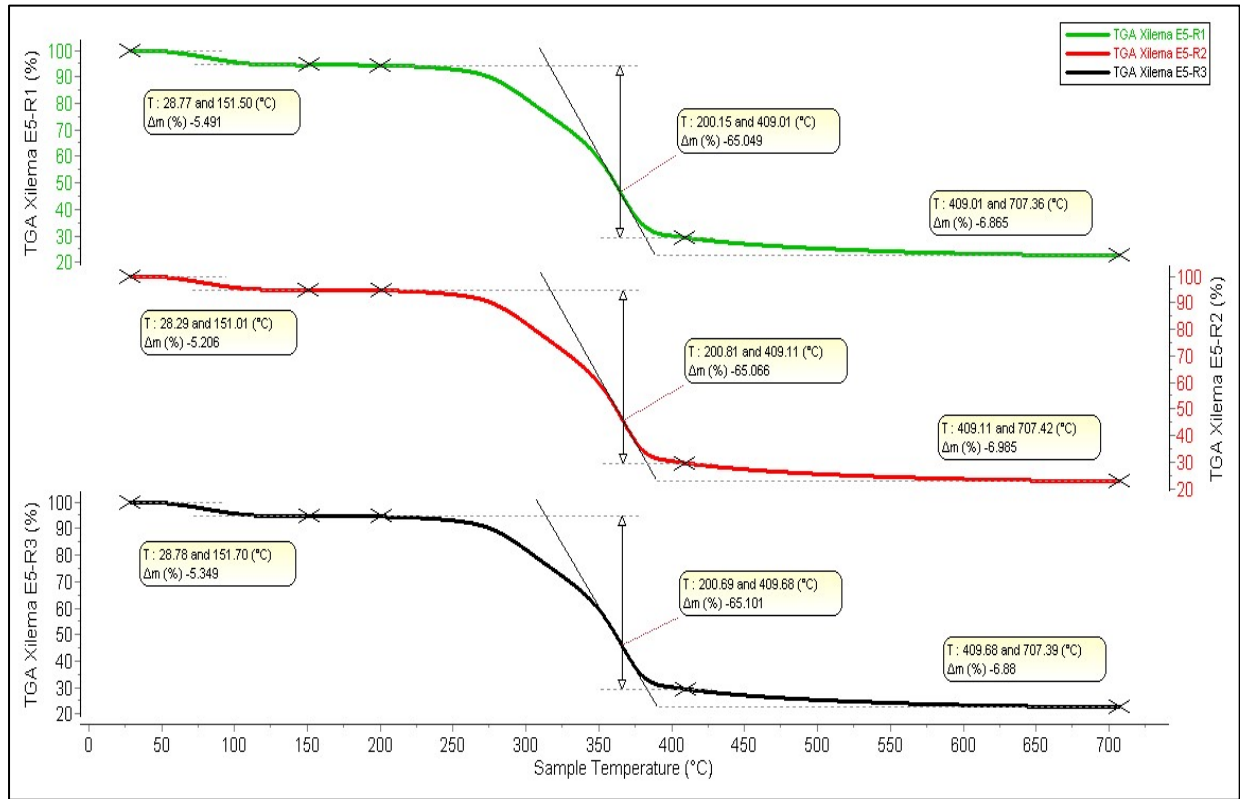


Figura 1. Termogramas TGA de pirólisis en Xilema E5

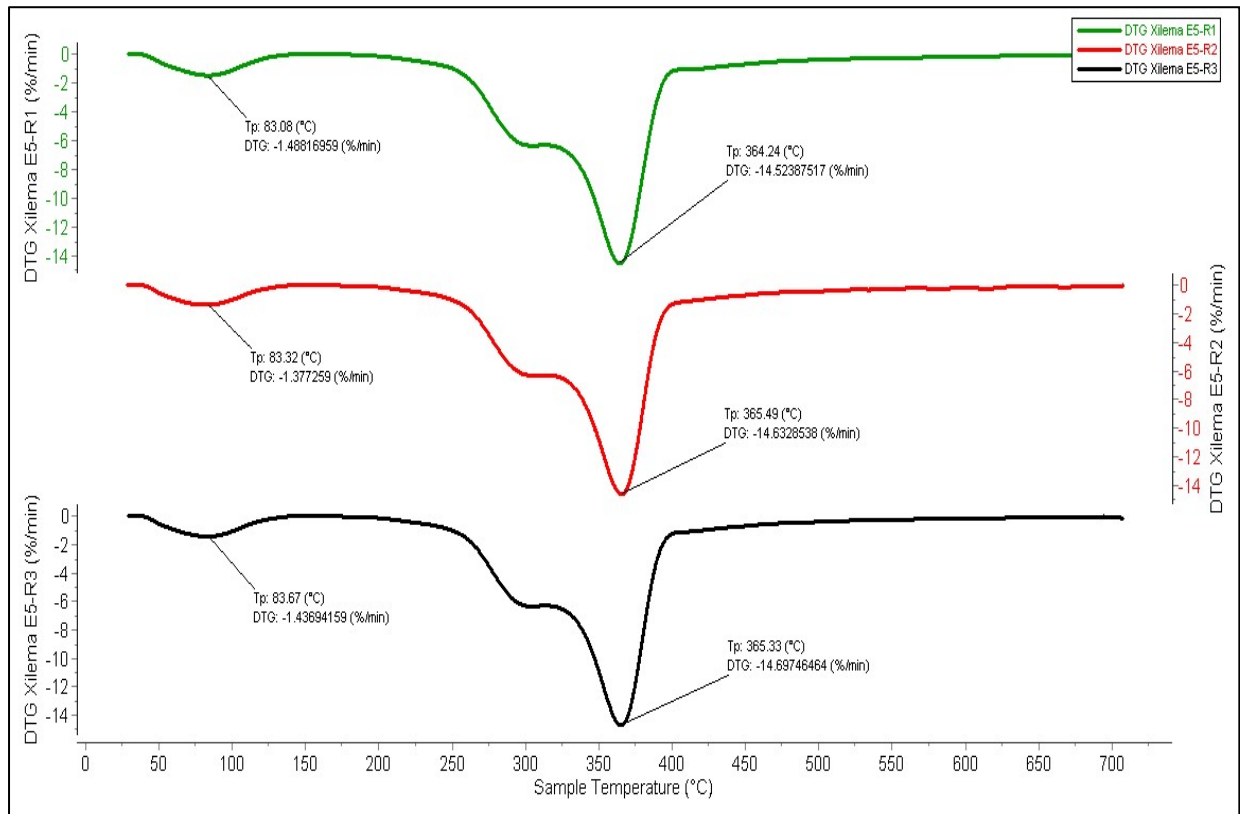


Figura 2. Termogramas DTG de pirólisis en Xilema E5



RESULTADOS DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	06/11/2023 Hora: 11:00 a.m.
Solicitante	Calero Reyes Keiko Mireille
Tipo de muestra	Madera
Código	Xilema E8
Cantidad muestra	3.5 g
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	0028237/0028616
Observaciones	• Análisis TGA (pirólisis)

2. Programación del experimento

Calorímetro	Labsys Evo Robot – gas option TGA-DSC 1600 °C
Marca	SETARAM (Francia)
Calibración	Indio y Aluminio (99.999%)
Nombre del experimento	Xilema E8
Nombre genérico	Experimento 2
Peso de la muestra	10 ± 1.5 mg
Tipo de crisol	Alúmina 100 µL

3. Rampas de calentamiento

Zona estándar	Rango de temperatura	Velocidad de escaneo	Tiempo	Flujo del gas	Gas usado
Estabilización	25°C – 25°C	-----	30 min	50 mL/min	Argón
Calentamiento I	25°C – 700°C	10 °C/min	-----	50 mL/min	Argón
Enfriamiento	700°C – 30°C	20 °C/min	-----	50 mL/min	Argón

Ing. Trujillo Ccanahuire, José L.
Especialista Área de Calorimetría

Dr. Soria Iturri, Melchor
Director del Laboratorio Central de Investigación - UNAS



4. Transiciones detectadas:

4.1. Análisis termogravimétrico (Pirolisis) de Xilema E8

Zonas Detectadas	Repeticiones	Rango de Temperatura		ΔT °C	Tp° máxima Degradación (°C)	Velocidad de pérdida (%/min)	Δm (%)
		Ti (°C)	Tf (°C)	(Tf - Ti)			
Zona 1	R1	39.07	134.33	95.26	81.61	1.543	5.993
	R2	37.44	135.25	97.81	80.77	1.394	5.694
	R3	36.48	135.75	99.27	81.40	1.474	5.663
Zona 2	R1	206.71	405.59	198.88	361.36	14.018	63.646
	R2	206.87	406.20	199.33	361.50	13.979	65.255
	R3	206.76	406.56	199.8	361.66	14.226	64.502
Zona 3	R1	405.59	701.76	296.17	-	-	7.635
	R2	406.20	702.16	295.96	-	-	7.141
	R3	406.56	702.15	295.59	-	-	7.337

Ti : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; Δm : variación de masa

4.2. Análisis complementario de la Pirolisis en Xilema E8

Muestra	Repeticiones	% Humedad (UNE-EN 14774-1)	% Material Volátil (UNE-EN 15148)
Xilema E8	R1	5.99	71.28
	R2	5.69	72.40
	R3	5.66	71.84

4.3. Determinación de Carbono Fijo en Xilema E8

Análisis	Repeticiones	Δm (%)
Carbono Fijo	R1	18.01
	R2	17.32
	R3	17.96

$$\% \text{ Carbono Fijo} = 100 - (\%H + \%MV + \%C)$$

Donde:

- %H: Humedad
- %MV: Material volátil
- %C: Ceniza

5. Termogramas del Análisis TGA

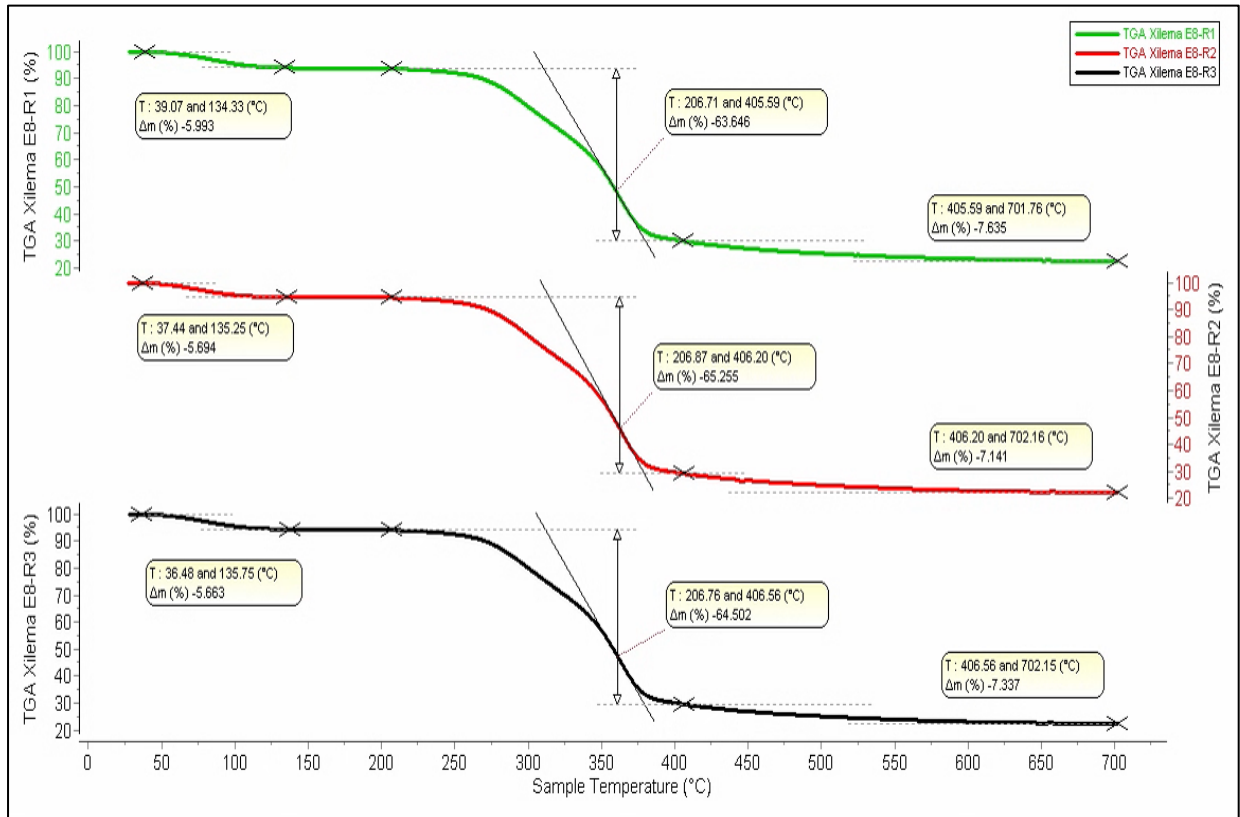


Figura 1. Termogramas TGA de pirolisis en Xilema E8

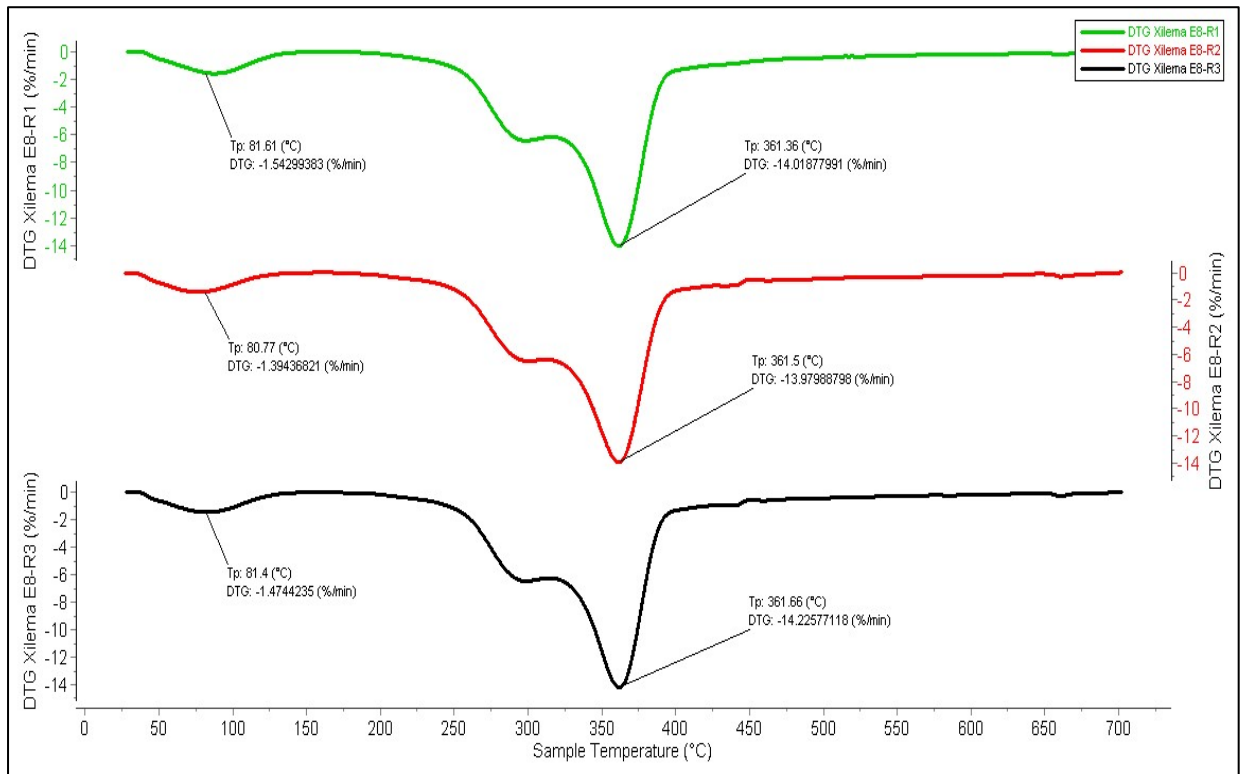


Figura 2. Termogramas DTG de pirolisis en Xilema E8

Anexo D. Resultados de análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido en simultáneo (TGA/DSC) en el proceso de combustión



**RESULTADOS DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO Y CALORIMETRÍA
DIFERENCIAL DE BARRIDO EN SIMULTÁNEO (TGA/DSC)**

1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	06/11/2023 Hora: 11:00 a.m.
Solicitante	Calero Reyes Keiko Mireille
Tipo de muestra	Madera
Código	Corteza E3
Cantidad muestra	3.5 g
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	0028237/0028616
Observaciones	• Análisis TGA y DSC simultáneo (Combustión)

2. Programación del experimento

Calorímetro	Labsys Evo Robot – gas option TGA-DSC 1600 °C
Marca	SETARAM
Calibración	Indio y Aluminio (99.999%)
Nombre del experimento	Corteza E3
Nombre genérico	Experimento 1
Peso de la muestra	10 ± 0.5 mg
Tipo de crisol	Alúmina 100 µL

3. Rampas de calentamiento

Zona estándar	Rango de temperatura	Velocidad de escaneo	Tiempo	Flujo del gas	Gas usado
Estabilización	25°C – 25°C	-----	30 min	60 mL/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno
Calentamiento	25°C – 700°C	10 °C/min	-----	60 mL/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno
Enfriamiento	700°C – 30°C	20 °C/min	-----	60 mL/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno

Ing. Trujillo Ccanahuire, José L.
Especialista Área de Calorimetría

Dr. Soria Iturri, Melchor
Director del Laboratorio Central de
Investigación - UNAS



4. Transiciones detectadas:

4.1. Resultados de Termogravimetría TGA y DTG en muestra de Corteza E3

Zonas Detectadas	Repeticiones	Rango de Temperatura		ΔT °C	Tp° máxima Degradación (°C)	Velocidad de pérdida (%/min)	Δm (%)
		Ti (°C)	Tf (°C)	(Tf - Ti)			
Zona 1	R1	39.42	148.04	108.62	86.66	1.595	5.813
	R2	39.16	148.43	109.27	86.60	1.524	5.675
	R3	39.16	148.87	109.71	86.19	1.546	5.851
Zona 2	R1	190.00	383.81	193.81	323.97	9.699	55.118
	R2	189.69	383.08	193.39	324.3	9.660	54.857
	R3	190.36	383.41	193.05	324.25	9.648	55.130
Zona 3	R1	383.81	705.57	321.76	413.12	4.067	30.272
	R2	383.08	705.65	322.57	417.67	4.922	30.396
	R3	383.41	705.10	321.69	415.37	4.446	30.166

Ti : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; Δm : variación de masa

4.2. Análisis complementario de Combustión de Corteza E3

Análisis	Repeticiones	MDC Δm (%)	Residuo Δm (%)
Ceniza (UNE-EN 14775)	R1	91.203	8.797
	R2	90.928	9.072
	R3	91.147	8.853

MDC : Masa total descompuesta en la combustión TGA

4.3. Resultados de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) en muestra de Corteza E3

Transición	Repetición	Tipo de reacción	To (°C)	Tp1 (°C)	Tf (°C)	ΔH (Kcal/Kg)
1	R1	Endotérmica	27.60	85.363	150.18	38.29
	R2	Endotérmica	28.16	87.361	151.01	39.21
	R3	Endotérmica	28.16	90.379	150.47	39.62
2	R1	Exotérmica	220.64	458.627	548.28	-2042.02
	R2	Exotérmica	221.84	451.948	545.67	-2038.44
	R3	Exotérmica	220.01	454.843	544.02	-2040.08

To : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; ΔH : Entalpía Combustión

4.4. Poder calórico en muestra de Corteza E3

Muestra	Repetición	Poder Calórico (Kcal/Kg)
Corteza E3	R1	2042.02
	R2	2038.44
	R3	2040.08

5. Termogramas del Análisis simultáneo TGA/DSC.

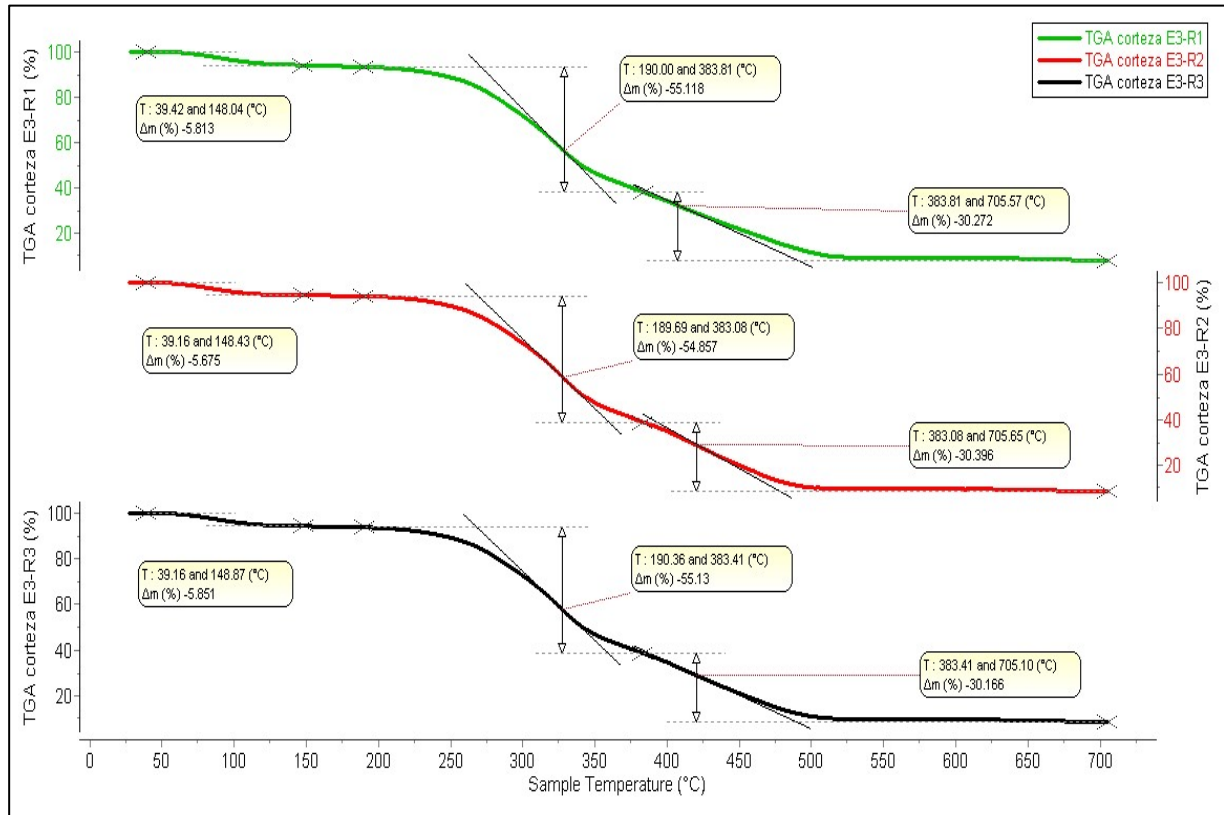


Figura 1. Termogramas TGA de combustión en Corteza E3

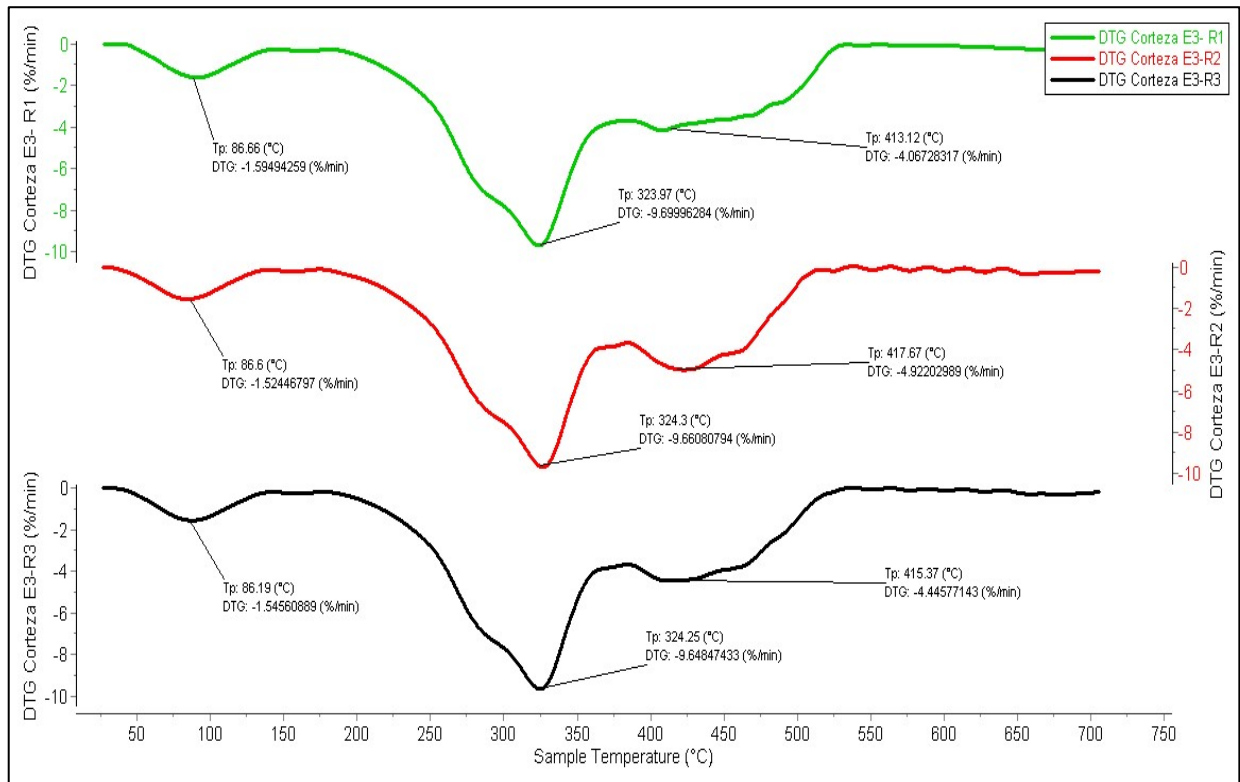


Figura 2. Termogramas DTG de combustión en Corteza E3

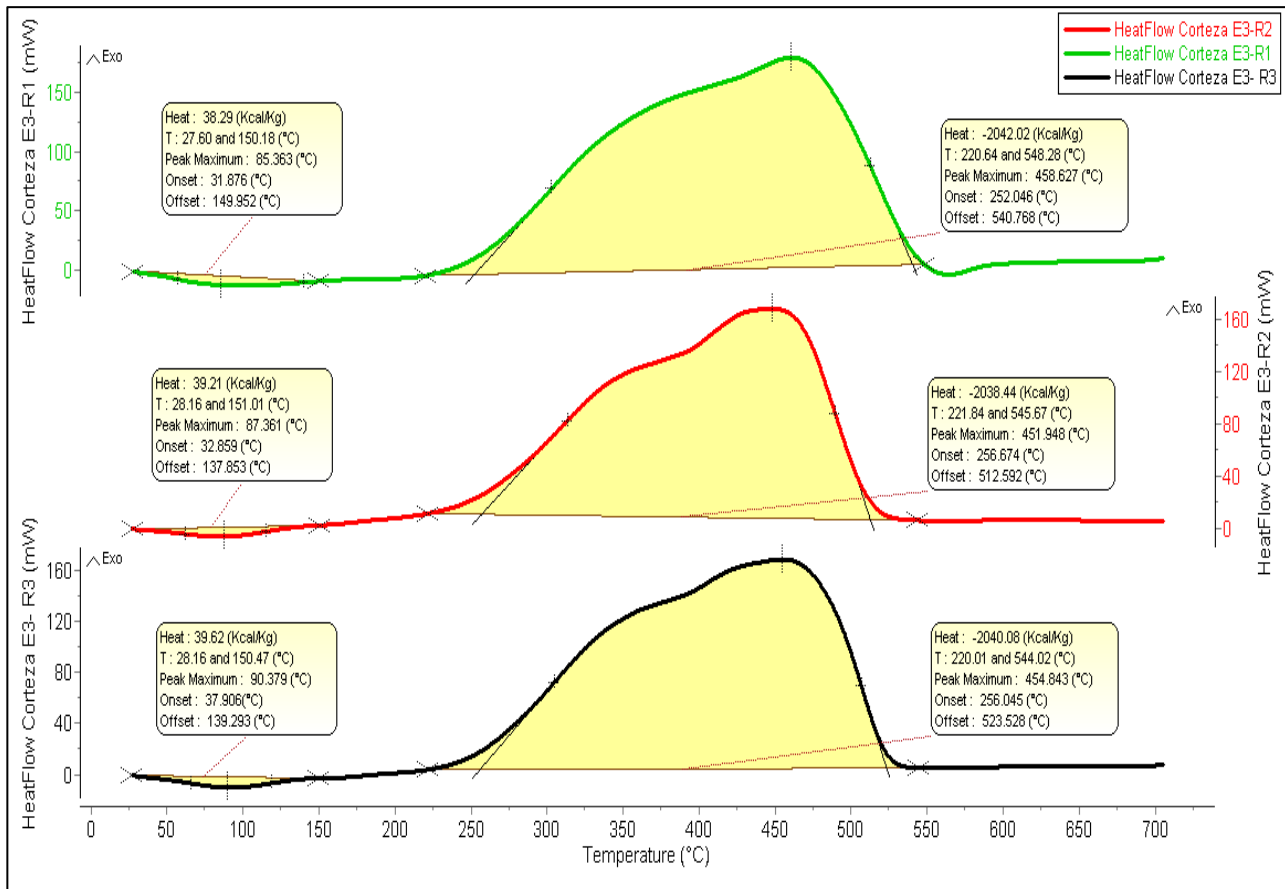


Figura 3. Termogramas DSC de combustión en Cortezas E3



**RESULTADOS DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO Y CALORIMETRÍA
DIFERENCIAL DE BARRIDO EN SIMULTÁNEO (TGA/DSC)**

1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	06/11/2023 Hora: 11:00 a.m.
Solicitante	Calero Reyes Keiko Mireille
Tipo de muestra	Madera
Código	Corteza E5
Cantidad muestra	3.0 g
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	0028237/0028616
Observaciones	• Análisis TGA y DSC simultáneo (Combustión)

2. Programación del experimento

Calorímetro	Labsys Evo Robot – gas option TGA-DSC 1600 °C
Marca	SETARAM
Calibración	Indio y Aluminio (99.999%)
Nombre del experimento	Corteza E5
Nombre genérico	Experimento 1
Peso de la muestra	10 ± 1.5 mg
Tipo de crisol	Alúmina 100 µL

3. Rampas de calentamiento

Zona estándar	Rango de temperatura	Velocidad de escaneo	Tiempo	Flujo del gas	Gas usado
Estabilización	25°C – 25°C	-----	30 min	60 mL/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno
Calentamiento	25°C – 700°C	10 °C/min	-----	60 ml/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno
Enfriamiento	700°C – 30°C	20 °C/min	-----	60 mL/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno


Ing. Trujillo Ccanahuire, José L.
Especialista Área de Calorimetría


Dr. Soria Iturri, Melchor
Director del Laboratorio Central de
Investigación - UNAS



4. Transiciones detectadas:

4.1. Resultados de Termogravimetría TGA y DTG en muestra de Corteza E5

Zonas Detectadas	Repeticiones	Rango de Temperatura		ΔT °C	Tp° máxima Degradación (°C)	Velocidad de pérdida (%/min)	Δm (%)
		Ti (°C)	Tf (°C)	(Tf - Ti)			
Zona 1	R1	42.41	144.27	101.86	84.38	1.478	5.988
	R2	42.79	144.07	101.28	84.94	1.541	5.710
	R3	42.02	144.15	102.13	84.42	1.502	5.849
Zona 2	R1	190.74	378.70	187.96	325.90	9.377	53.891
	R2	190.03	378.95	188.92	325.40	9.927	53.734
	R3	190.17	378.42	188.25	325.12	9.597	53.726
Zona 3	R1	378.70	705.62	326.92	423.33	5.079	30.633
	R2	378.95	705.18	326.23	422.92	4.458	31.837
	R3	378.42	705.57	327.15	422.21	4.764	31.332

Ti : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; Δm : variación de masa

4.2. Análisis complementario de Combustión de Corteza E5

Análisis	Repeticiones	MDC Δm (%)	Residuo Δm (%)
Ceniza (UNE-EN 14775)	R1	90.512	9.488
	R2	91.281	8.719
	R3	90.907	9.093

MDC : Masa total descompuesta en la combustión TGA

4.3. Resultados de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) en muestra de Corteza E5

Transición	Repetición	Tipo de reacción	To (°C)	Tp1 (°C)	Tf (°C)	ΔH (Kcal/Kg)
1	R1	Endotérmica	30.33	88.33	140.56	36.73
	R2	Endotérmica	30.09	88.452	141.00	37.52
	R3	Endotérmica	30.08	87.089	140.66	36.17
2	R1	Exotérmica	205.33	451.17	537.24	-2132.10
	R2	Exotérmica	205.11	451.02	537.72	-2108.41
	R3	Exotérmica	205.35	452.91	537.02	-2125.11

To : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; ΔH : Entalpía Combustión

4.4. Poder calórico en muestra de Corteza E5

Muestra	Repetición	Poder Calórico (Kcal/Kg)
Corteza E5	R1	2132.10
	R2	2108.41
	R3	2125.11

5. Termogramas del Análisis simultáneo TGA/DSC.

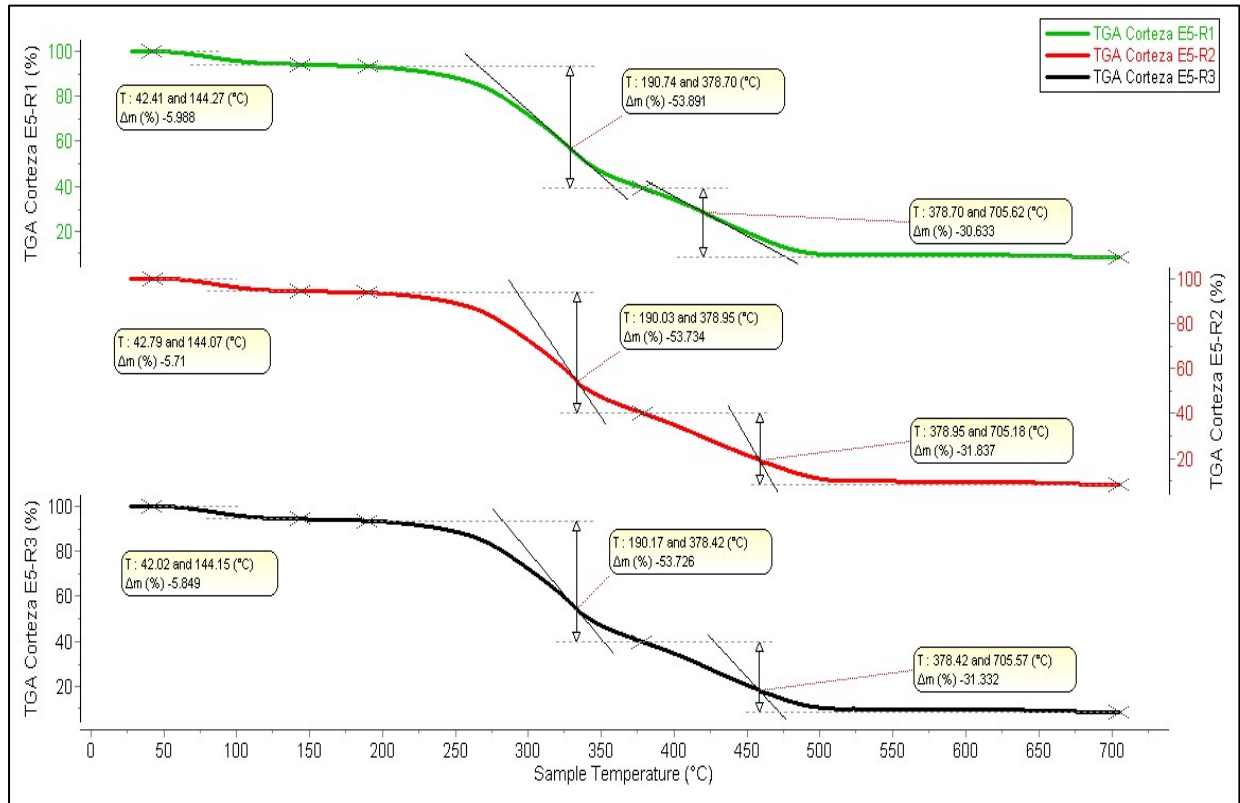


Figura 1. Termogramas TGA de combustión en Corteza E5

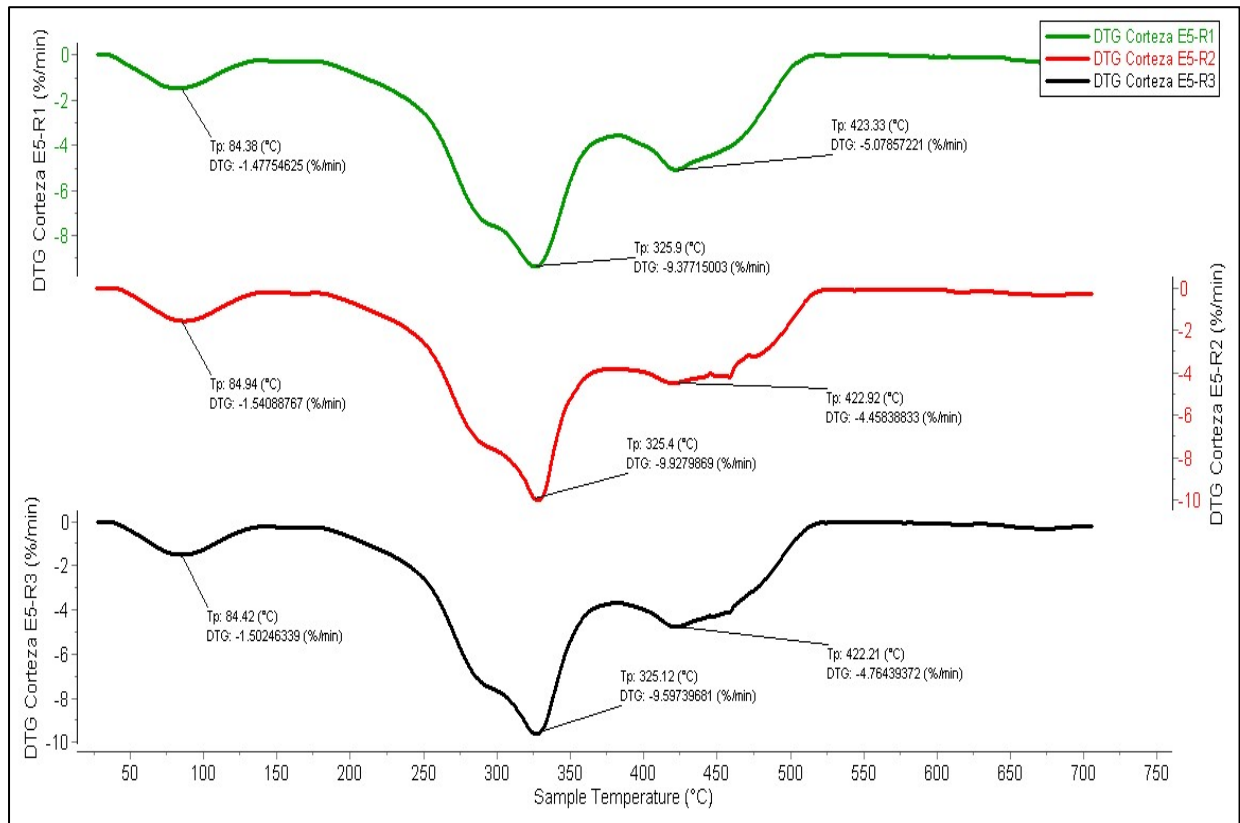


Figura 2. Termogramas DTG de combustión en Corteza E5

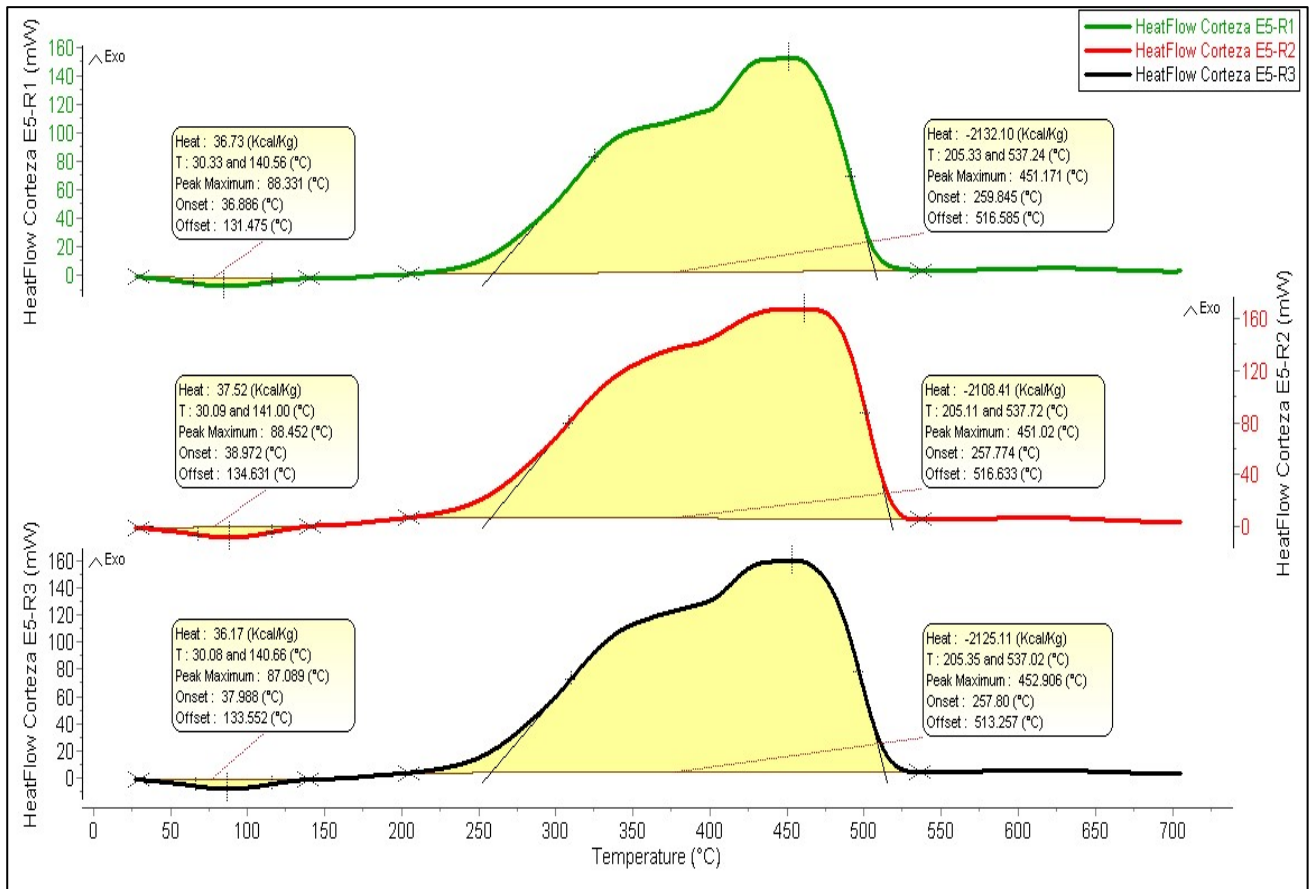


Figura 3. Termogramas DSC de combustión en Corteza E5



**RESULTADOS DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO Y CALORIMETRÍA
DIFERENCIAL DE BARRIDO EN SIMULTÁNEO (TGA/DSC)**

1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	06/11/2023 Hora: 11:00 a.m.
Solicitante	Calero Reyes Keiko Mireille
Tipo de muestra	Madera
Código	Corteza E8
Cantidad muestra	3.4 g
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	0028237/0028616
Observaciones	• Análisis TGA y DSC simultáneo (Combustión)

2. Programación del experimento

Calorímetro	Labsys Evo Robot – gas option TGA-DSC 1600 °C
Marca	SETARAM
Calibración	Indio y Aluminio (99.999%)
Nombre del experimento	Corteza E8
Nombre genérico	Experimento 1
Peso de la muestra	10 ± 0.5 mg
Tipo de crisol	Alúmina 100 µL

3. Rampas de calentamiento

Zona estándar	Rango de temperatura	Velocidad de escaneo	Tiempo	Flujo del gas	Gas usado
Estabilización	25°C – 25°C	-----	30 min	60 mL/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno
Calentamiento	25°C – 700°C	10 °C/min	-----	60 ml/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno
Enfriamiento	700°C – 30°C	20 °C/min	-----	60 mL/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno


Ing. Trujillo Ccanahuire, José L.
Especialista Área de Calorimetría


Dr. Soria Iturri, Melchor
Director del Laboratorio Central de
Investigación - UNAS



4. Transiciones detectadas:

4.1. Resultados de Termogravimetría TGA y DTG en muestra de Corteza E8

Zonas Detectadas	Repeticiones	Rango de Temperatura		ΔT °C (Tf - Ti)	Tp° máxima Degradación (°C)	Velocidad de pérdida (%/min)	Δm (%)
		Ti (°C)	Tf (°C)				
Zona 1	R1	30.18	139.35	109.17	81.36	1.414	5.542
	R2	30.91	139.10	108.19	81.17	1.405	5.534
	R3	30.65	139.01	108.36	81.19	1.449	5.735
Zona 2	R1	189.62	380.33	190.71	327.68	8.236	50.971
	R2	189.06	380.21	191.15	327.06	8.429	51.353
	R3	189.86	380.41	190.55	327.10	8.559	51.18
Zona 3	R1	380.33	705.69	325.36	430.40	4.561	29.136
	R2	380.21	705.33	325.12	430.89	5.855	28.737
	R3	380.41	705.51	325.1	430.35	5.237	28.906

Ti : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; Δm : variación de masa

4.2. Análisis complementario de Combustión de Corteza E8

Análisis	Repeticiones	MDC Δm (%)	Residuo Δm (%)
Ceniza (UNE-EN 14775)	R1	85.649	14.351
	R2	85.624	14.376
	R3	85.821	14.179

MDC : Masa total descompuesta en la combustión TGA

4.3. Resultados de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) en muestra de Corteza E8

Transición	Repetición	Tipo de reacción	To (°C)	Tp1 (°C)	Tf (°C)	ΔH (Kcal/Kg)
1	R1	Endotérmica	29.65	84.020	137.65	29.93
	R2	Endotérmica	29.25	84.360	137.13	29.83
	R3	Endotérmica	29.31	84.309	137.13	30.47
2	R1	Endotérmica	144.30	166.16	188.89	3.75
	R2	Endotérmica	145.68	166.88	189.86	3.77
	R3	Endotérmica	145.79	166.77	187.82	3.67
3	R1	Exotérmica	201.40	438.039	534.33	-2078.97
	R2	Exotérmica	202.41	440.165	537.12	-2074.14
	R3	Exotérmica	201.38	440.007	535.28	-2084.63

To : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; ΔH : Entalpía Combustión

4.4. Poder calórico en muestra de Corteza E8

Muestra	Repetición	Poder Calórico (Kcal/Kg)
Corteza E8	R1	2078.97
	R2	2074.14
	R3	2084.63

5. Termogramas del Análisis simultáneo TGA/DSC.

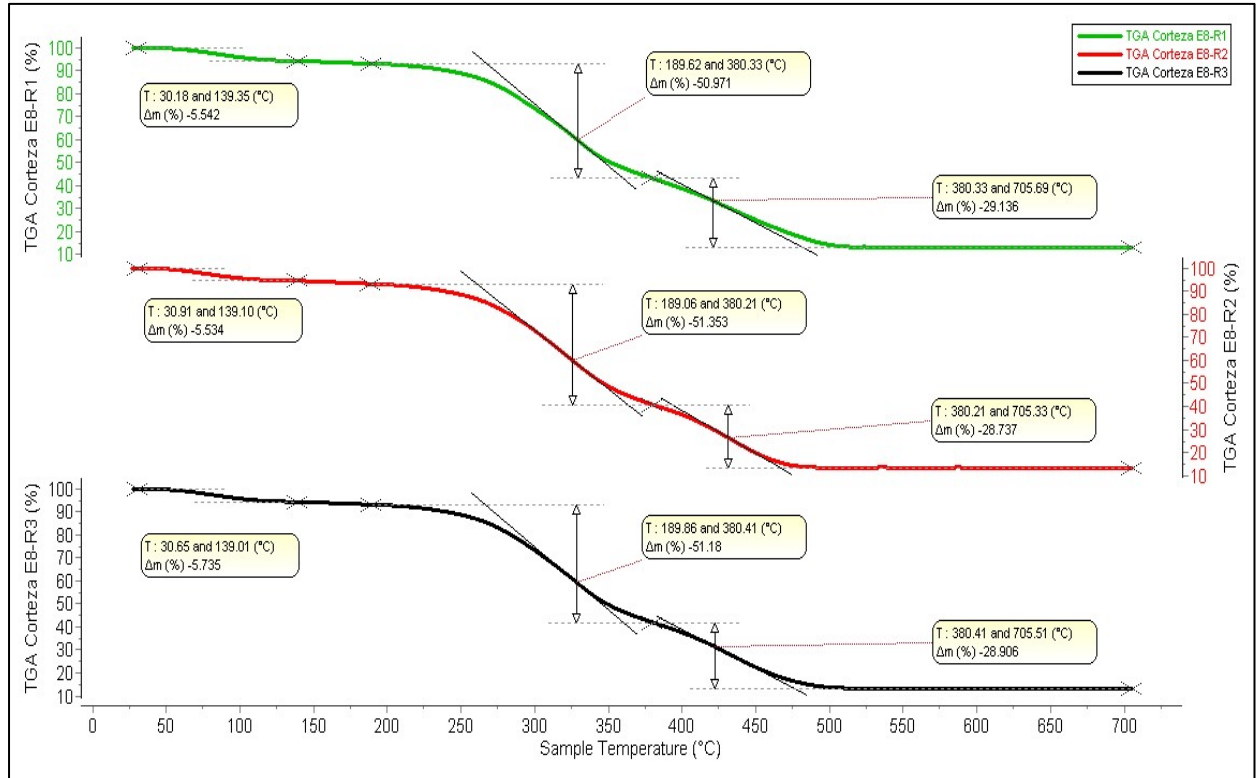


Figura 1. Termogramas TGA de combustión en Corteza E8

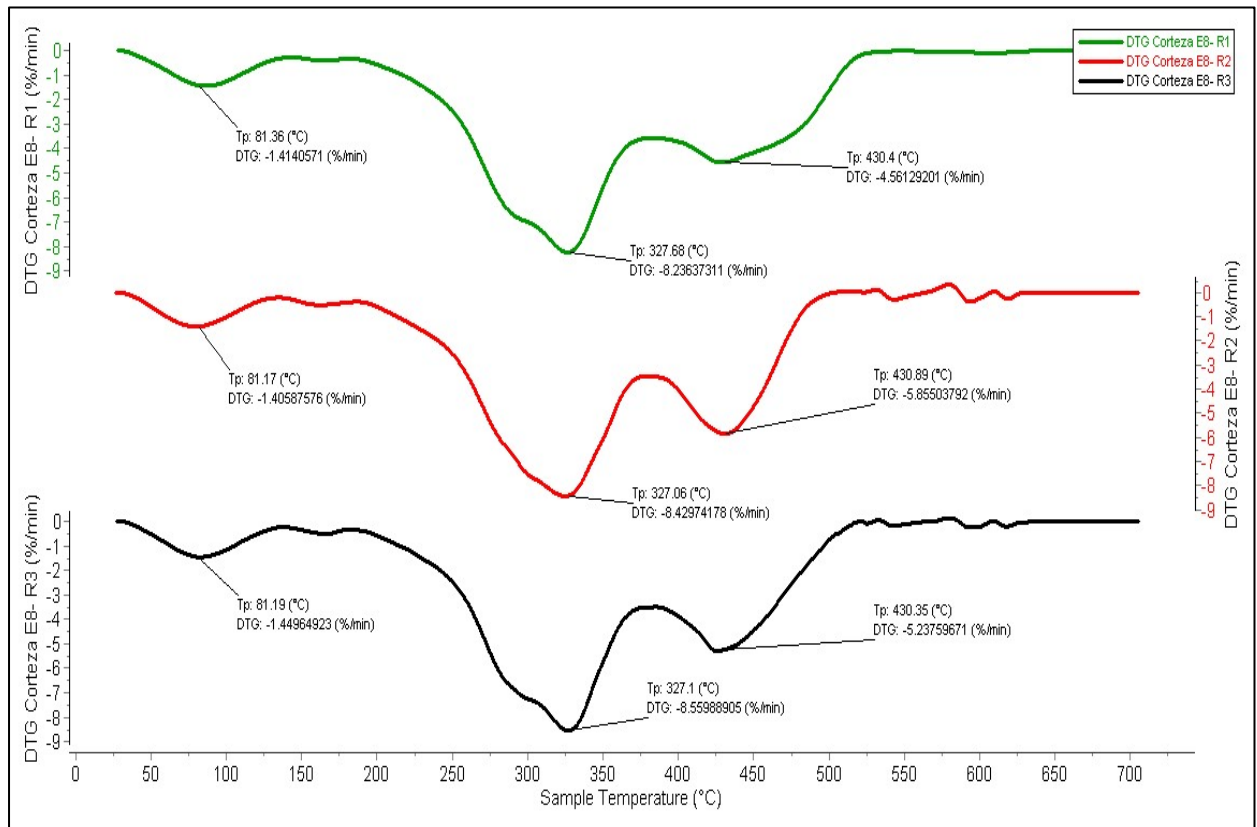


Figura 2. Termogramas DTG de combustión en Corteza E8

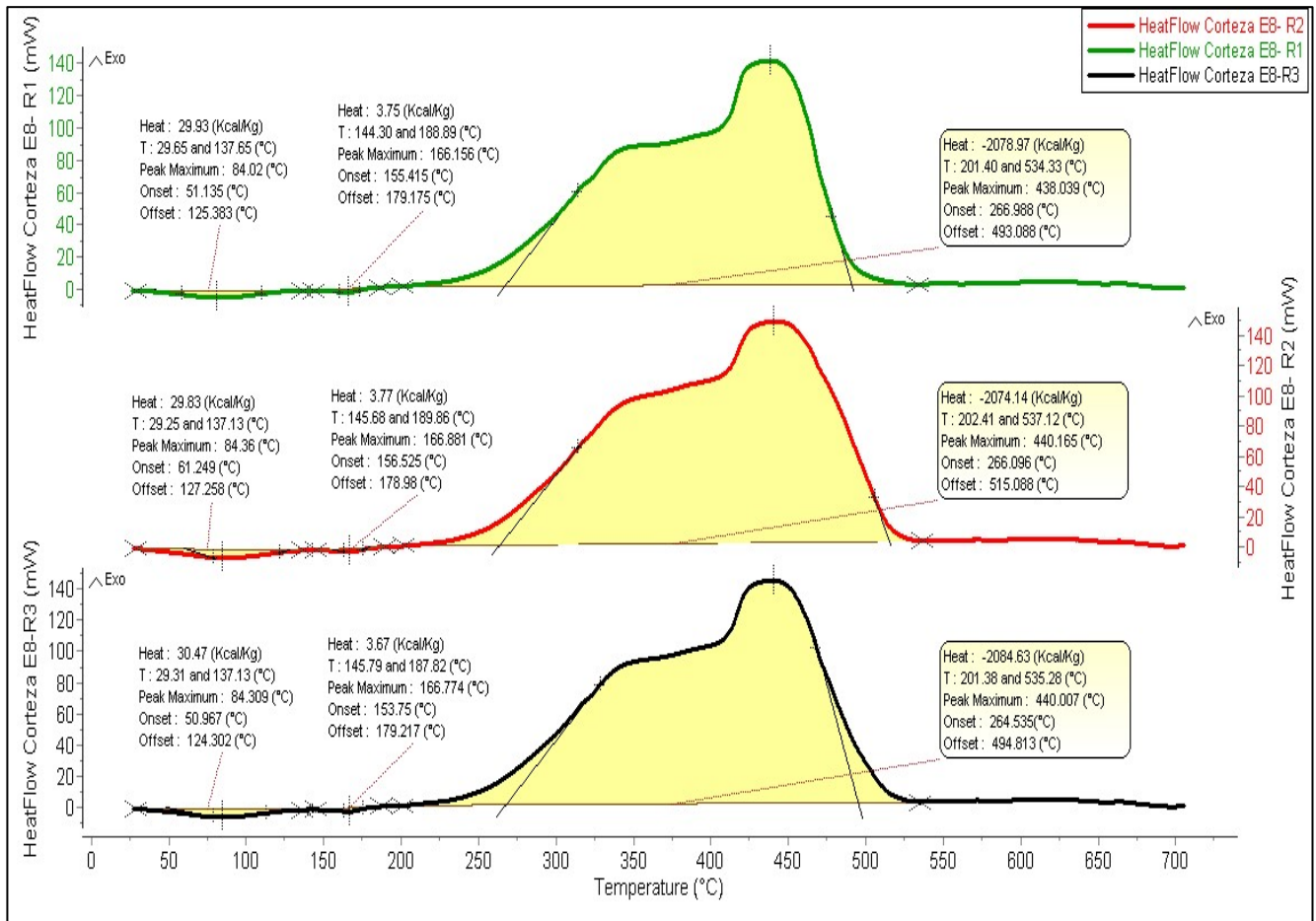


Figura 3. Termogramas DSC de combustión en Corteza E8



**RESULTADOS DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO Y CALORIMETRÍA
DIFERENCIAL DE BARRIDO EN SIMULTÁNEO (TGA/DSC)**

1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	06/11/2023 Hora: 11:00 a.m.
Solicitante	Calero Reyes Keiko Mireille
Tipo de muestra	Madera
Código	Xilema E3
Cantidad muestra	3.0 g
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	0028237/0028616
Observaciones	• Análisis TGA y DSC simultáneo (Combustión)

2. Programación del experimento

Calorímetro	Labsys Evo Robot – gas option TGA-DSC 1600 °C
Marca	SETARAM
Calibración	Indio y Aluminio (99.999%)
Nombre del experimento	Xilema E3
Nombre genérico	Experimento 1
Peso de la muestra	10 ± 0.5 mg
Tipo de crisol	Alúmina 100 µL

3. Rampas de calentamiento

Zona estándar	Rango de temperatura	Velocidad de escaneo	Tiempo	Flujo del gas	Gas usado
Estabilización	25°C – 25°C	-----	30 min	60 mL/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno
Calentamiento	25°C – 700°C	10 °C/min	-----	60 ml/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno
Enfriamiento	700°C – 30°C	20 °C/min	-----	60 mL/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno


Ing. Trujillo Ccanahuire, José L.
Especialista Área de Calorimetría


Dr. Soria Iturri, Melchor
Director del Laboratorio Central de
Investigación - UNAS



4. Transiciones detectadas:

4.1. Resultados de Termogravimetría TGA y DTG en muestra de Xilema E3

Zonas Detectadas	Repeticiones	Rango de Temperatura		ΔT °C	Tp° máxima Degradación (°C)	Velocidad de pérdida (%/min)	Δm (%)
		Ti (°C)	Tf (°C)	(Tf - Ti)			
Zona 1	R1	46.58	140.58	94.00	83.79	1.766	5.224
	R2	45.42	140.02	94.60	83.31	1.723	4.878
	R3	44.40	140.53	96.13	83.80	1.754	5.628
Zona 2	R1	214.76	381.64	166.88	324.27	15.533	62.340
	R2	214.73	381.15	166.42	324.24	14.941	62.219
	R3	214.90	381.00	166.10	324.40	15.363	62.416
Zona 3	R1	381.64	705.34	323.70	434.78	4.288	25.359
	R2	381.15	705.40	324.25	434.50	5.039	24.599
	R3	381.00	705.40	324.40	435.05	4.651	24.752

Ti : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; Δm : variación de masa

4.2. Análisis complementario de Combustión de Xilema E3

Análisis	Repeticiones	MDC Δm (%)	Residuo Δm (%)
Ceniza (UNE-EN 14775)	R1	92.923	7.077
	R2	91.696	8.304
	R3	92.796	7.204

MDC : Masa total descompuesta en la combustión TGA

4.3. Resultados de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) en muestra de Xilema E3

Transición	Repetición	Tipo de reacción	To (°C)	Tp1 (°C)	Tp2 (°C)	Tf (°C)	ΔH (Kcal/Kg)
1	R1	Endotérmica	28.08	89.147	-	140.02	41.98
	R2	Endotérmica	29.58	86.38	-	140.96	40.91
	R3	Endotérmica	28.02	87.569	-	140.07	41.27
2	R1	Exotérmica	216.06	357.07	443.477	539.85	-1575.71
	R2	Exotérmica	215.78	356.29	437.999	506.73	-1588.75
	R3	Exotérmica	216.84	356.02	439.399	506.01	-1664.68

To : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; ΔH : Entalpía Combustión

4.4. Poder calórico en muestra de Xilema E3

Muestra	Repetición	Poder Calórico (Kcal/Kg)
Xilema E3	R1	1575.71
	R2	1588.75
	R3	1664.68

5. Termogramas del Análisis simultáneo TGA/DSC.

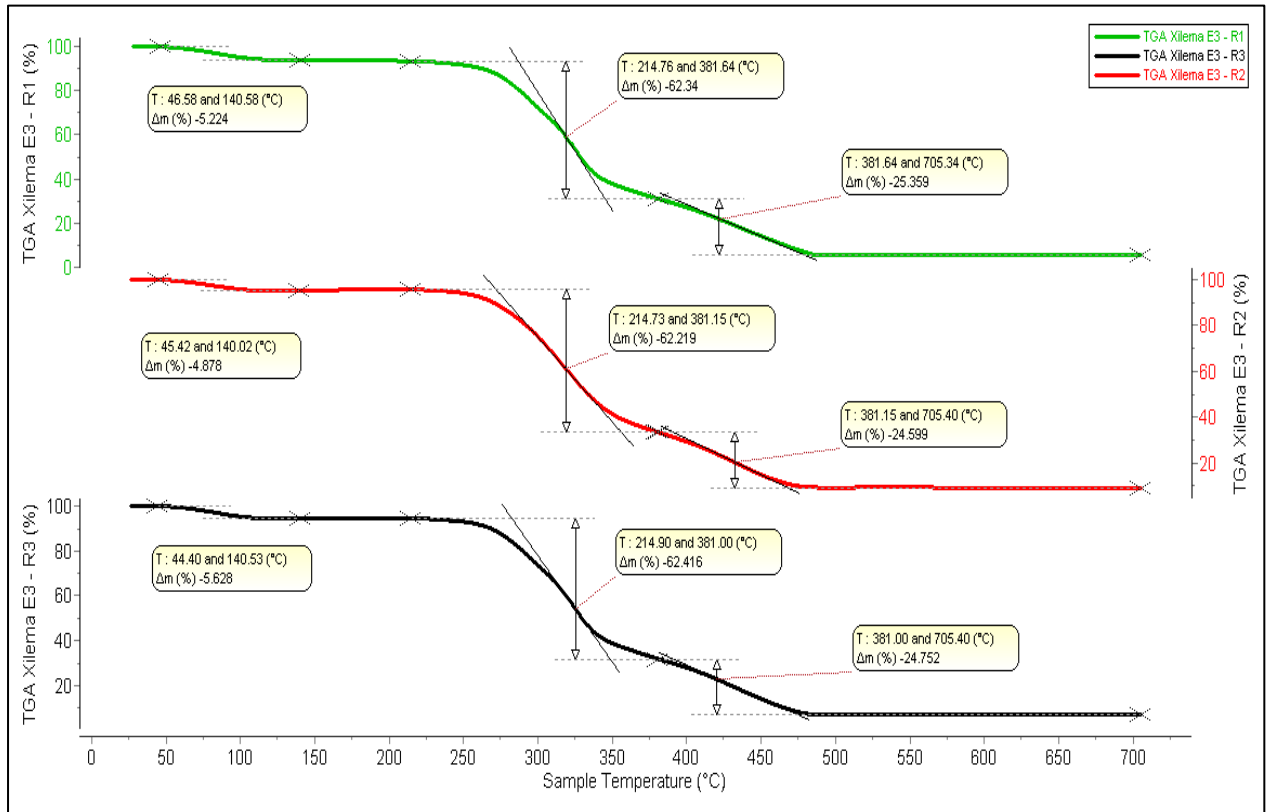


Figura 1. Termogramas TGA de combustión en Xilema E3

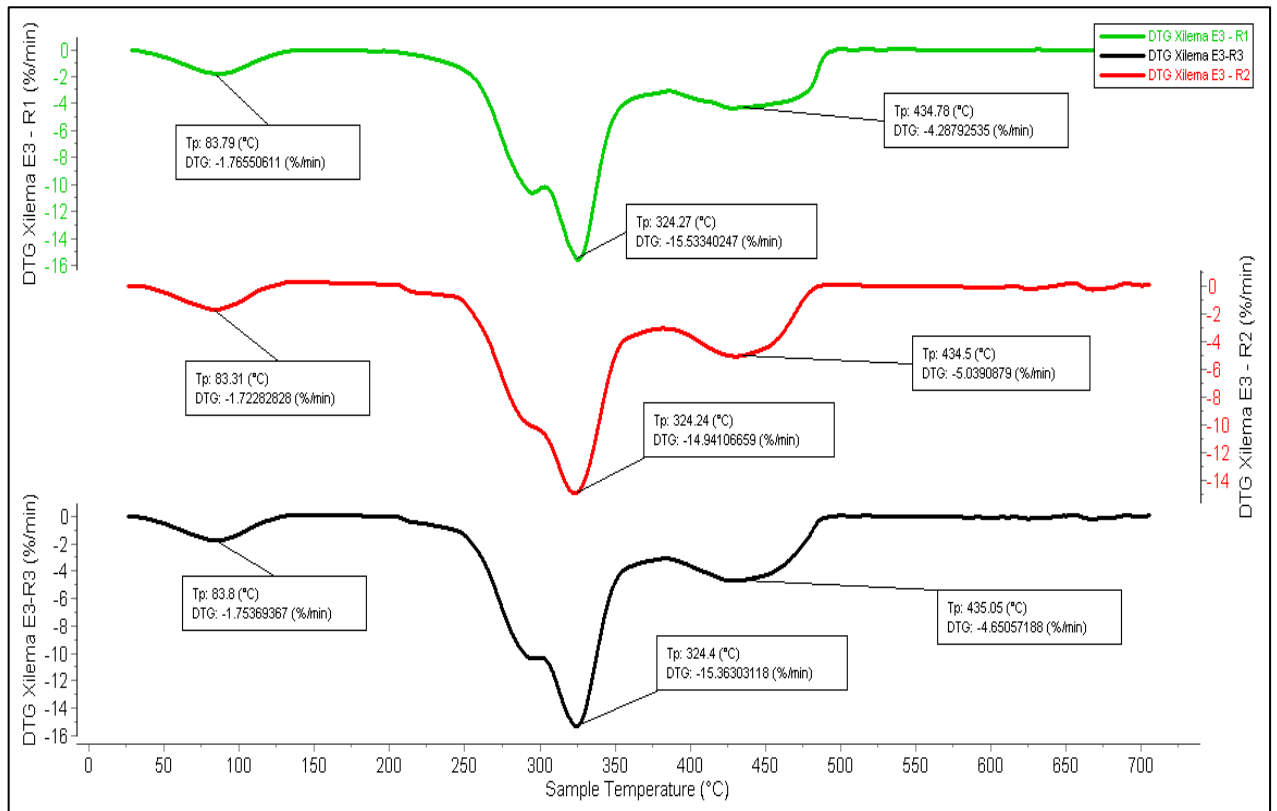


Figura 2. Termogramas DTG de combustión en Xilema E3

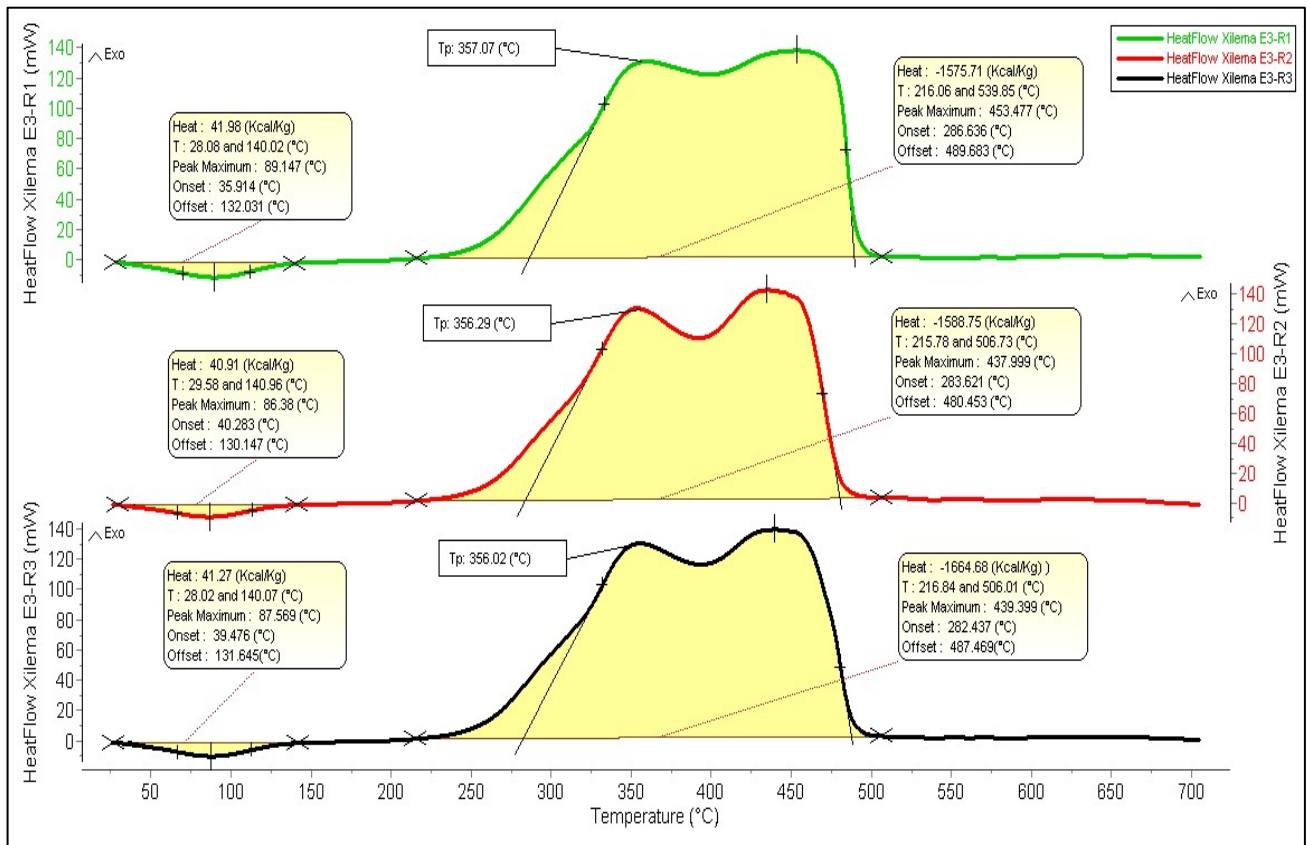


Figura 3. Termogramas DSC de combustión en Xilema E3



**RESULTADOS DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO Y CALORIMETRÍA
DIFERENCIAL DE BARRIDO EN SIMULTÁNEO (TGA/DSC)**

1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	06/11/2023 Hora: 11:00 a.m.
Solicitante	Calero Reyes Keiko Mireille
Tipo de muestra	Madera
Código	Xilema E5
Cantidad muestra	3.0 g
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	0028237/0028616
Observaciones	• Análisis TGA y DSC simultáneo (Combustión)

2. Programación del experimento

Calorímetro	Labsys Evo Robot – gas option TGA-DSC 1600 °C
Marca	SETARAM
Calibración	Indio y Aluminio (99.999%)
Nombre del experimento	Xilema E5
Nombre genérico	Experimento 1
Peso de la muestra	10 ± 0.5 mg
Tipo de crisol	Alúmina 100 µL

3. Rampas de calentamiento

Zona estándar	Rango de temperatura	Velocidad de escaneo	Tiempo	Flujo del gas	Gas usado
Estabilización	25°C – 25°C	-----	30 min	60 mL/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno
Calentamiento	25°C – 700°C	10 °C/min	-----	60 ml/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno
Enfriamiento	700°C – 30°C	20 °C/min	-----	60 mL/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno

Ing. Frujillo Ccanahuire, José L.
Especialista Área de Calorimetría

Dr. Soria Iturri, Melchor
Director del Laboratorio Central de
Investigación - UNAS



4. Transiciones detectadas:

4.1. Resultados de Termogravimetría TGA y DTG en muestra de Xilema E5

Zonas Detectadas	Repeticiones	Rango de Temperatura		ΔT °C	Tp° máxima Degradación (°C)	Velocidad de pérdida (%/min)	Δm (%)
		Ti (°C)	Tf (°C)	(Tf - Ti)			
Zona 1	R1	32.95	138.09	105.14	82.63	1.594	5.95
	R2	32.57	138.00	105.43	82.69	1.637	5.76
	R3	31.97	138.44	106.47	83.42	1.622	5.85
Zona 2	R1	209.11	384.69	175.58	328.04	16.653	64.851
	R2	209.00	385.98	176.98	328.52	17.908	64.568
	R3	209.48	385.88	176.4	328.11	17.547	64.801
Zona 3	R1	384.69	705.74	321.05	431.07	4.747	24.267
	R2	385.98	705.54	319.56	437.5	4.984	24.616
	R3	385.88	705.64	319.76	435.32	4.818	24.346

Ti : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; Δm : variación de masa

4.2. Análisis complementario de Combustión de Xilema E5

Análisis	Repeticiones	MDC Δm (%)	Residuo Δm (%)
Ceniza (UNE-EN 14775)	R1	95.068	4.932
	R2	94.944	5.056
	R3	94.997	5.003

MDC : Masa total descompuesta en la combustión TGA

4.3. Resultados de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) en muestra de Xilema E5

Transición	Repetición	Tipo de reacción	To (°C)	Tp1 (°C)	Tp2 (°C)	Tf (°C)	ΔH (Kcal/Kg)
1	R1	Endotérmica	28.77	86.92	-	142.24	40.07
	R2	Endotérmica	28.84	85.65	-	141.70	39.73
	R3	Endotérmica	28.75	86.08	-	141.76	39.77
2	R1	Exotérmica	208.01	356.26	445.83	507.91	-1756.64
	R2	Exotérmica	205.14	356.31	446.50	509.95	-1847.27
	R3	Exotérmica	203.72	356.37	446.23	507.67	-1800.73

To : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; ΔH : Entalpía Combustión

4.4. Poder calórico en muestra de Xilema E5

Muestra	Repetición	Poder Calórico (Kcal/Kg)
Xilema E5	R1	1756.64
	R2	1847.27
	R3	1800.73

5. Termogramas del Análisis simultáneo TGA/DSC.

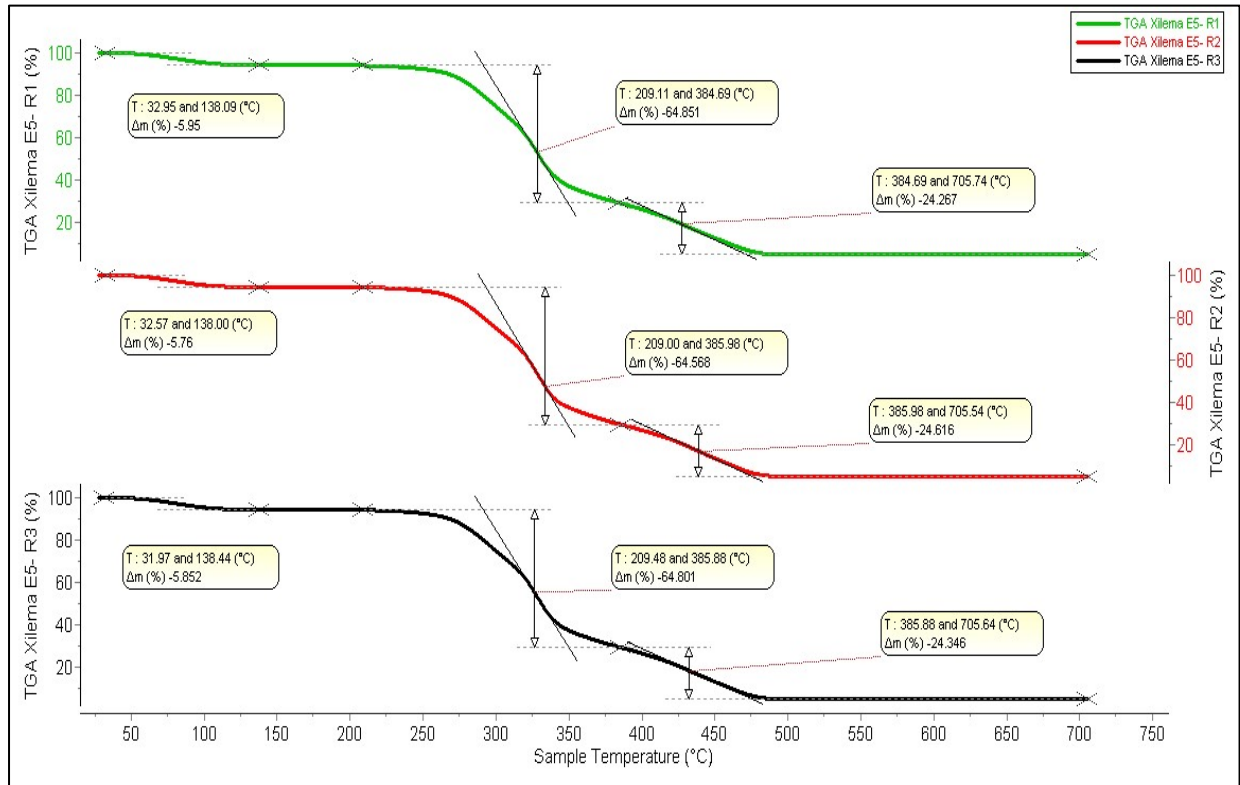


Figura 1. Termogramas TGA de combustión en Xilema E5

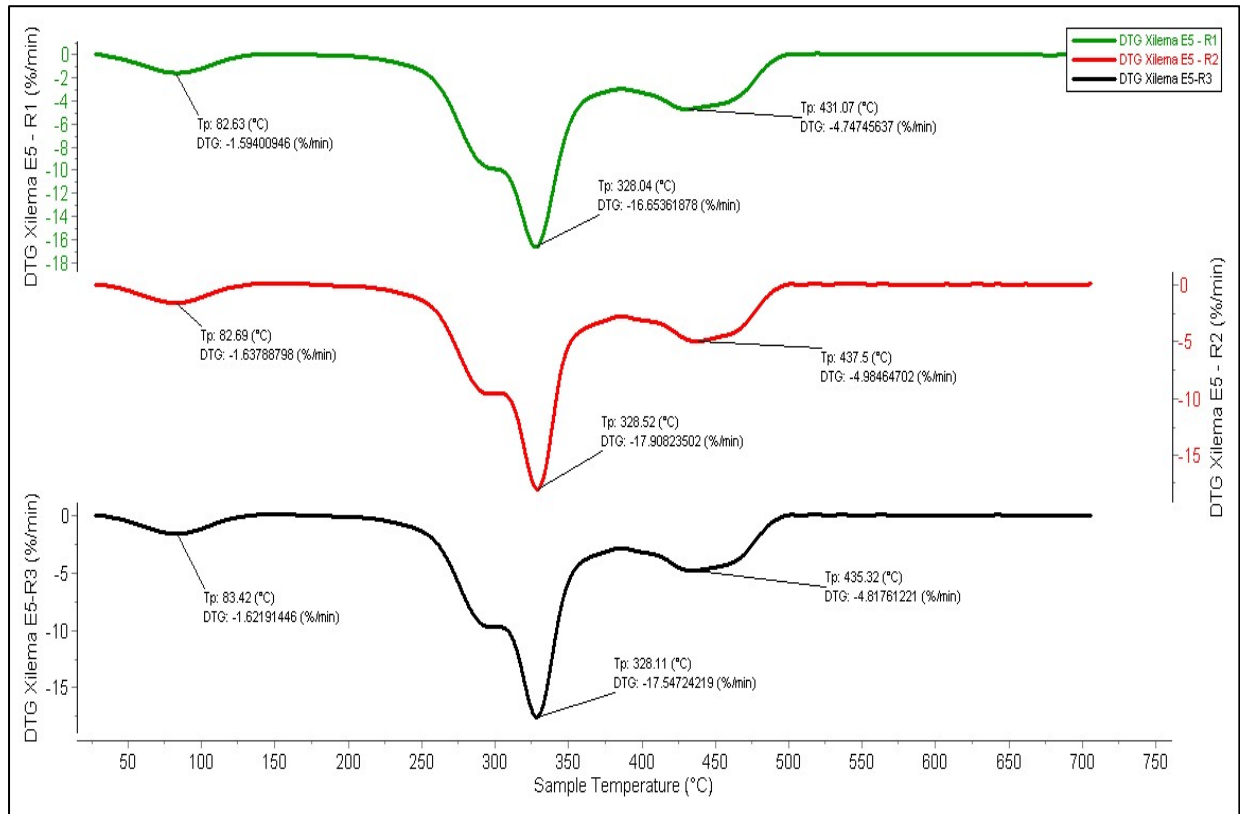


Figura 2. Termogramas DTG de combustión en Xilema E5

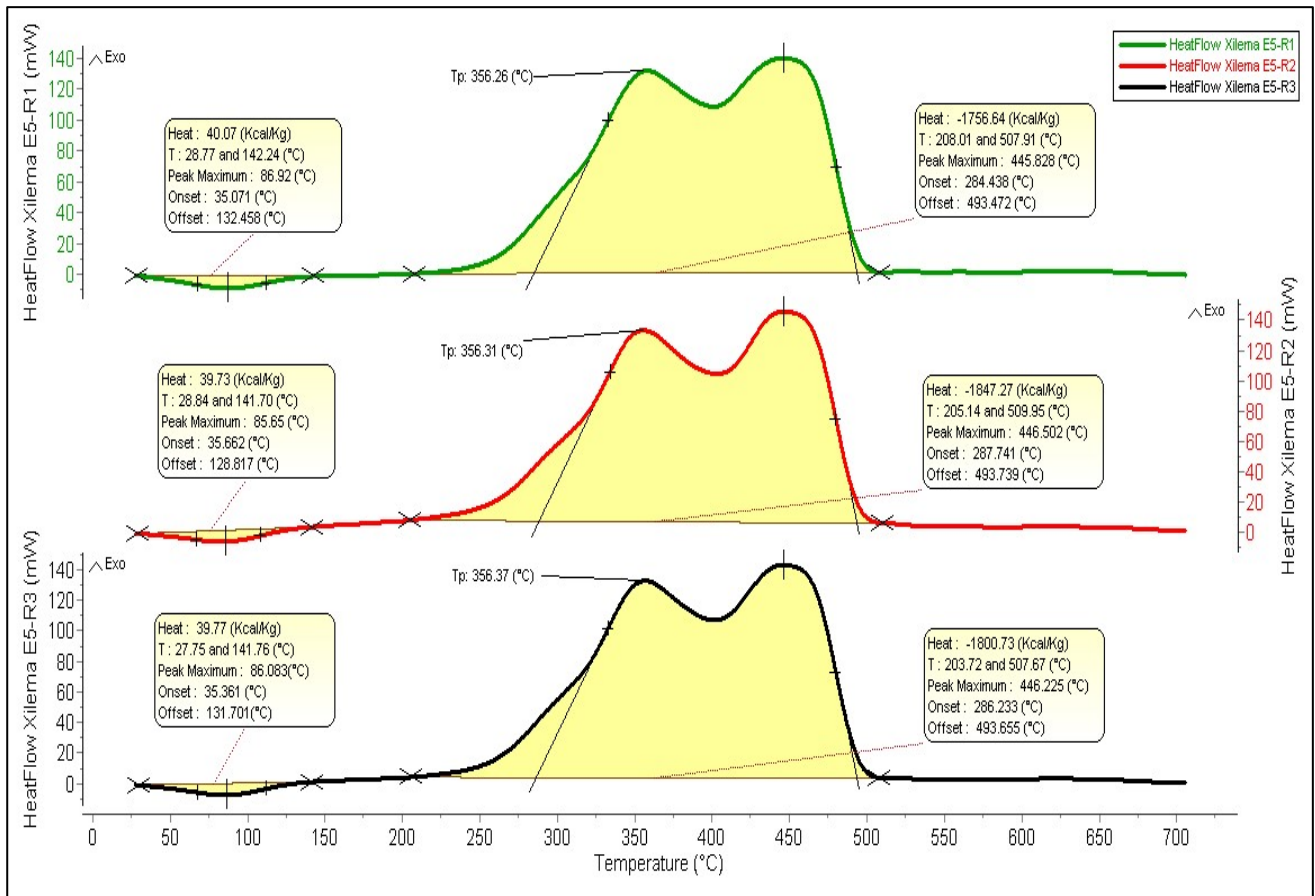


Figura 3. Termogramas DSC de combustión en Xilema E5



**RESULTADOS DE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO Y CALORIMETRÍA
DIFERENCIAL DE BARRIDO EN SIMULTÁNEO (TGA/DSC)**

1. Descripción de la muestra

Fecha de recepción	06/11/2023 Hora: 11:00 a.m.
Solicitante	Calero Reyes Keiko Mireille
Tipo de muestra	Madera
Código	Xilema E8
Cantidad muestra	3.5 g
Humedad referencial	No especificada
N° de Recibo	0028237/0028616
Observaciones	• Análisis TGA y DSC simultáneo (Combustión)

2. Programación del experimento

Calorímetro	Labsys Evo Robot – gas option TGA-DSC 1600 °C
Marca	SETARAM
Calibración	Indio y Aluminio (99.999%)
Nombre del experimento	Xilema E8
Nombre genérico	Experimento 1
Peso de la muestra	10 ± 0.5 mg
Tipo de crisol	Alúmina 100 µL

3. Rampas de calentamiento

Zona estándar	Rango de temperatura	Velocidad de escaneo	Tiempo	Flujo del gas	Gas usado
Estabilización	25°C – 25°C	-----	30 min	60 mL/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno
Calentamiento	25°C – 700°C	10 °C/min	-----	60 ml/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno
Enfriamiento	700°C – 30°C	20 °C/min	-----	60 mL/min	Argón
				16 mL/min	Oxígeno


Ing. Trujillo Ccanahuire, José L.
Especialista Área de Calorimetría


Dr. Soria Iturri, Melchor
Director del Laboratorio Central de
Investigación - UNAS



4. Transiciones detectadas:

4.1. Resultados de Termogravimetría TGA y DTG en muestra de Xilema E8

Zonas Detectadas	Repeticiones	Rango de Temperatura		ΔT °C	Tp° máxima Degradación (°C)	Velocidad de pérdida (%/min)	Δm (%)
		Ti (°C)	Tf (°C)	(Tf - Ti)			
Zona 1	R1	28.15	143.54	115.39	85.50	1.561	5.214
	R2	26.56	143.44	116.88	85.12	1.688	5.251
	R3	26.56	144.05	117.49	85.50	1.592	5.227
Zona 2	R1	209.02	383.49	174.47	326.83	15.834	63.564
	R2	209.01	382.37	173.36	326.54	15.269	63.414
	R3	208.92	383.86	174.94	326.01	14.796	63.661
Zona 3	R1	383.49	705.59	322.1	432.82	4.368	26.508
	R2	382.37	701.12	318.75	433.79	4.218	26.742
	R3	383.86	705.62	321.76	433.58	4.303	26.574

Ti : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; Δm : variación de masa

4.2. Análisis complementario de Combustión de Xilema E8

Análisis	Repeticiones	MDC Δm (%)	Residuo Δm (%)
Ceniza (UNE-EN 14775)	R1	95.286	4.714
	R2	95.407	4.593
	R3	95.462	4.538

MDC : Masa total descompuesta en la combustión TGA

4.3. Resultados de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) en muestra de Xilema E8

Transición	Repetición	Tipo de reacción	To (°C)	Tp1 (°C)	Tp2 (°C)	Tf (°C)	ΔH (Kcal/Kg)
1	R1	Endotérmica	34.48	89.28	-	143.54	31.19
	R2	Endotérmica	35.57	90.81	-	143.39	31.29
	R3	Endotérmica	35.76	89.91	-	144.05	31.43
2	R1	Exotérmica	207.97	359.93	444.28	525.19	-1732.71
	R2	Exotérmica	208.87	359.01	443.11	523.50	-1778.88
	R3	Exotérmica	208.56	359.34	448.37	522.30	-1775.04

To : Temperatura inicial; Tf : Temperatura final; Tp : Temperatura pico; ΔH : Entalpía Combustión

4.4. Poder calórico en muestra de Xilema E8

Muestra	Repetición	Poder Calórico (Kcal/Kg)
Xilema E8	R1	1732.71
	R2	1778.88
	R3	1775.04

5. Termogramas del Análisis simultáneo TGA/DSC.

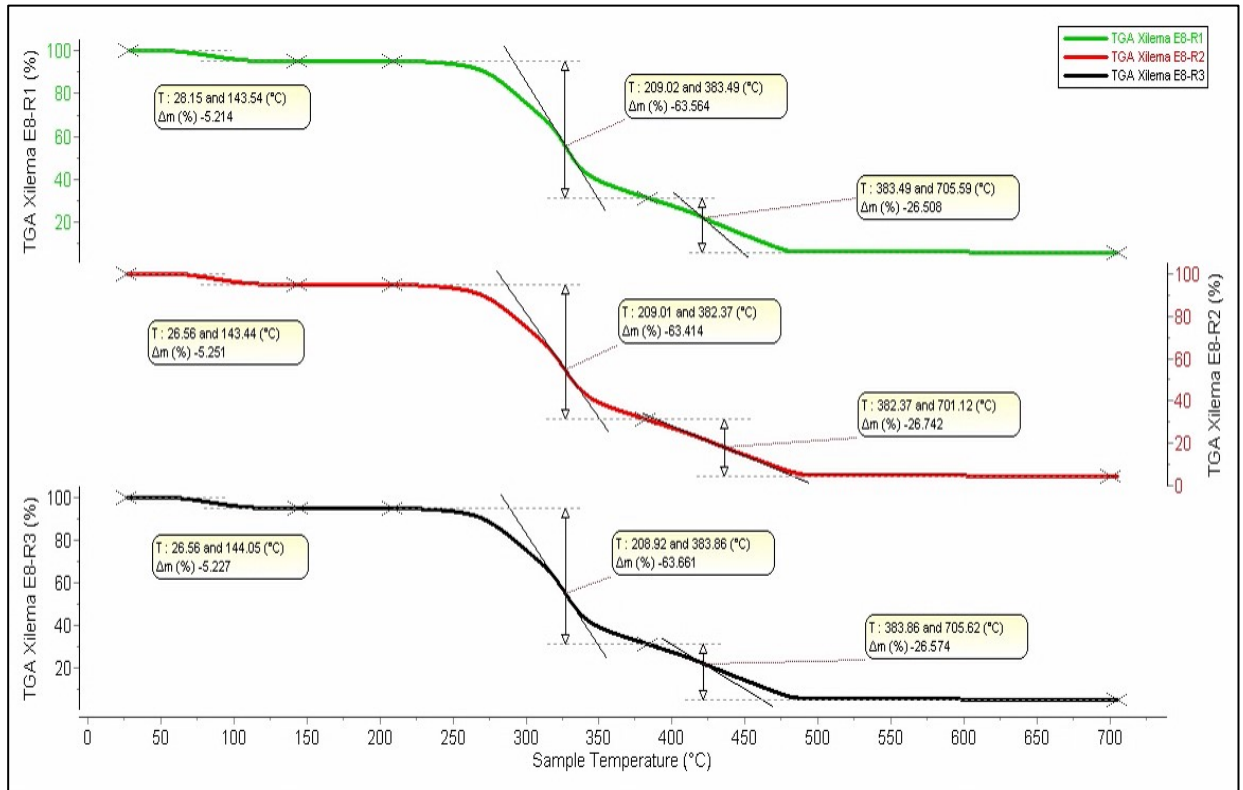


Figura 1. Termogramas TGA de combustión en Xilema E8

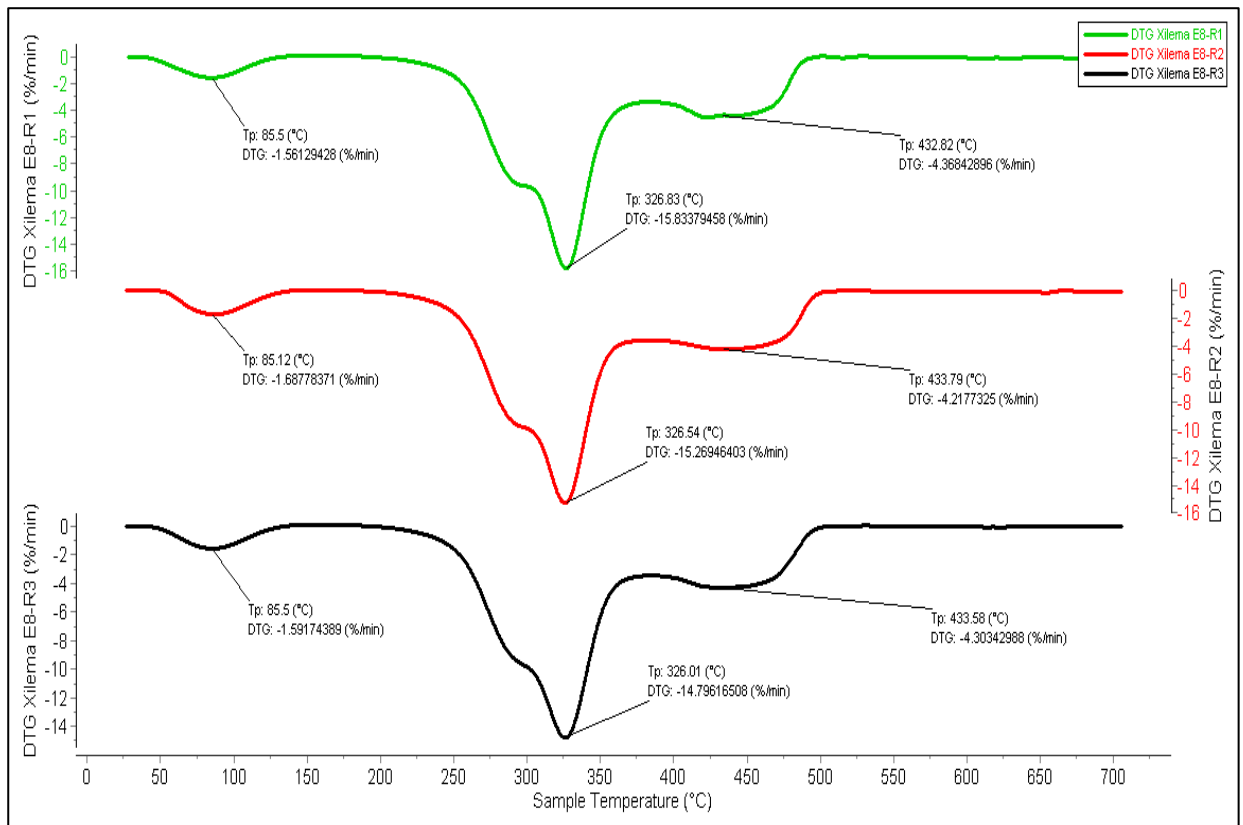


Figura 2. Termogramas DTG de combustión en Xilema E8

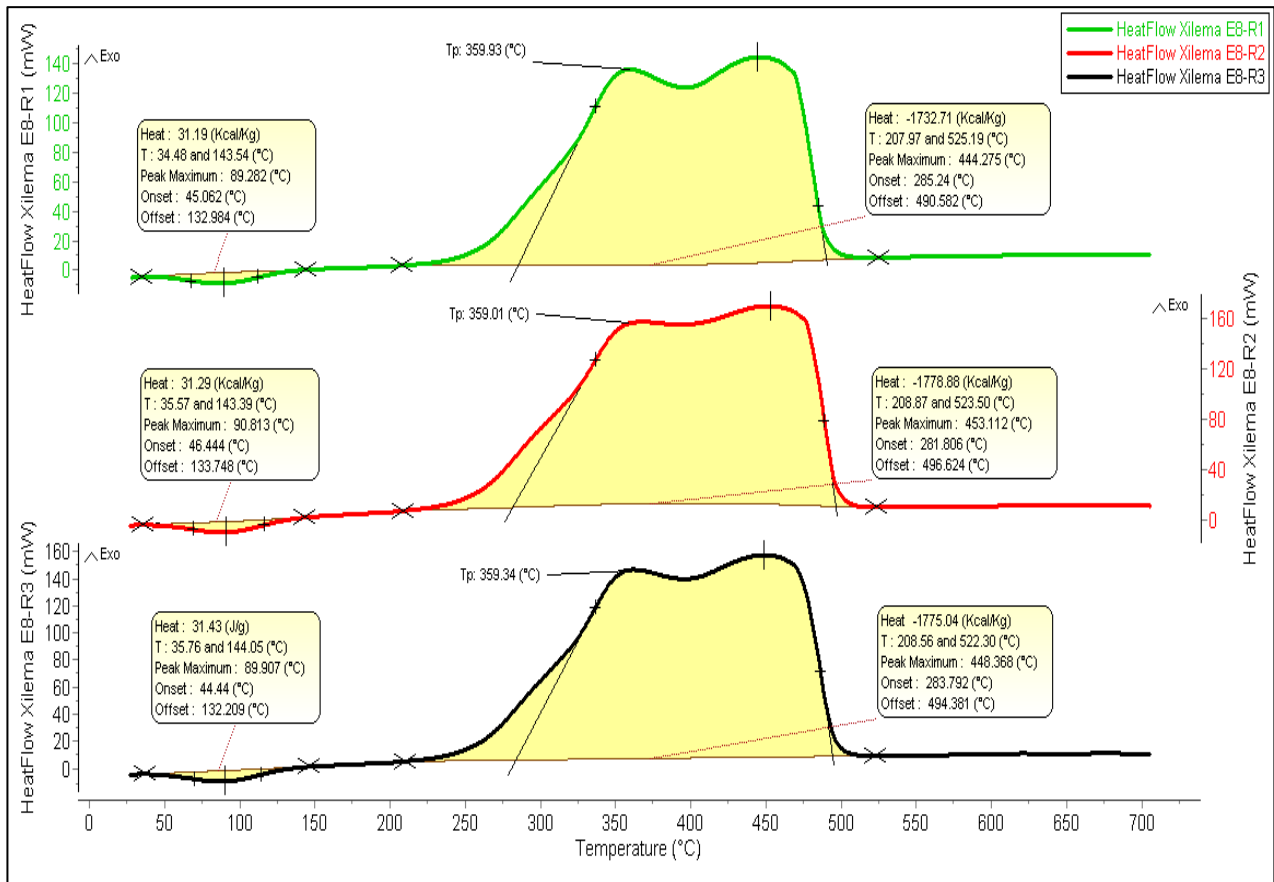


Figura 3. Termogramas DSC de combustión en Xilema E8