

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Evaluación del potencial de la estearina de palma hidrogenada para su uso como material de
cambio de fase

Aslhey Gissela Chinome Chinome y María Alejandra Sánchez Sepúlveda

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniera Química
Modalidad Investigación

Director

Viatcheslav Kafarov

Doctor en Ciencias Técnicas

Codirector

Víctor Alexis Lizcano González

Magister en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Química

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

A mis padres y a mi hermana que siempre creyeron en mis capacidades y me apoyaron en cada paso durante mi carrera.

Al profesor Víctor Lizcano, sin su esfuerzo y dedicación esto no hubiera sido posible.

A mi colega María Alejandra por ser una excelente compañera durante todo el desarrollo del proyecto.

Al único amigo que tuve durante mi carrera, que siempre estaba dispuesto a escuchar cada problema al que me enfrentaba.

A todas esas personas que me dieron aliento para seguir poniéndole empeño a mi carrera y a mi tesis.

A la agrupación Música y Danzas UIS, en especial a los músicos que hacen parte del grupo, por todos esos momentos que compartimos, los cuales enriquecieron mi alma y fortalecieron mi vocación.

A mi amuleto de la buena suerte, durante la pandemia en mis noches de desvelo solo me bastaba con verte acostado a mi lado para no sentirme sola, gracias Pascalito.

Aslhey Gissela Chinome Chinome

A Dios principalmente por permitirme haber llegado con éxito hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi mamá, a mi papá y a mi tía que siempre han sido incondicionales con su amor, apoyo, comprensión y motivación.

A mis abuelos que ya fallecieron, pero su recuerdo sigue intacto y son parte de mis motivos de seguir adelante para continuar cumpliendo mis metas.

Al profesor Víctor Lizcano y mi colega Ashley Chinome por la paciencia, los consejos, el tiempo y la dedicación durante todo el desarrollo del proyecto.

A cada una de esas personas que sin esperar nada a cambio me guiaron, me acompañaron, y me apoyaron a nivel personal y académico.

María Alejandra Sánchez Sepúlveda

Agradecimientos

Al profesor Víctor Lizcano por su paciencia, dedicación, esmero y por ser uno de los mejores profesores que tuvimos durante la carrera.

A la escuela de Ingeniería Química por apoyarnos en este proceso.

A la Universidad Industrial de Santander por ser nuestra alma máter y permitirnos el aprendizaje tanto académico como espiritual.

Aslhey Gissela Chinome Chinome y María Alejandra Sánchez Sepúlveda

Tabla de contenido

Introducción	11
1. Objetivos	13
1.1. Objetivo general.....	13
1.2. Objetivos específicos	13
2. Marco Teórico	14
2.1. Hidrogenación de grasas y aceites vegetales	14
2.2. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).....	16
2.3. Análisis termogravimétrico (TGA).....	17
2.4. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	18
2.5. Estado del arte.....	19
3. Metodología	24
3.1. Establecimiento de la oferta potencial de estearina de palma con base en datos secundarios del sector palmero en Colombia.	24
3.2. Caracterización de las propiedades térmicas y fisicoquímicas de la estearina de palma y de otros PCM.	25
3.2.1. Estimación de propiedades fisicoquímicas.....	25
3.2.2. Estimación de propiedades térmicas: Temperatura y entalpía de fusión, temperatura y entalpía de cristalización, estabilidad térmica y capacidad calorífica de sólido y líquido.	25
3.3. Comparación del desempeño térmico de la estearina de palma con otros materiales de cambio de fase.....	25
4. Resultados	26

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

4.1. Establecimiento de la oferta potencial de estearina de palma con base en datos secundarios del sector palmero en Colombia.	26
4.2. Caracterización de las propiedades térmicas y fisicoquímicas de la estearina de palma.	35
4.2.1. Estimación de las propiedades fisicoquímicas de la estearina de palma y estearina de palma hidrogenada.	35
4.2.2. Estimación de propiedades térmicas: Temperatura y entalpía de fusión, temperatura y entalpía de cristalización, estabilidad térmica y capacidad calorífica de sólido y líquido.	37
Conclusiones	42
Recomendaciones	43
Referencias.....	44
Apéndice	53

Lista de tablas

Tabla 1. Características de los diferentes grados de estearina de palma	22
Tabla 2. Propiedades térmicas, físicas, cinéticas, químicas y económicas deseadas en los PCM...	23
Tabla 3. Comparación del perfil de ácidos grasos del aceite de palma y el aceite híbrido interespecífico de <i>Elaeis oleifera</i> Coari y <i>Elaeis guineensis</i>	30
Tabla 4. Densidades en estado sólido y líquido de cada material estudiado.	36
Tabla 5. Análisis TGA de las muestras.....	39
Tabla 6. Temperaturas y entalpías de fusión y cristalización de los materiales estudiados	40
Tabla 7. Capacidades caloríficas, energía almacenada y costo de almacenamiento unitario de cada material.	41

Lista de figuras

Figura 1. Configuración cis y trans.....	14
Figura 2. Ácidos grasos presentes en aceites vegetales	15
Figura 3. Flujo de calor en función de la temperatura	16
Figura 4. Esquema de una curva de resultados de DSC	17
Figura 5. Curvas TGA de una muestra de PVC.....	18
Figura 6. Espectro FT-IR de una muestra de ácidos grasos eutécticos.....	19
Figura 7. Calor Almacenado en función de la temperatura, para un material de cambio de fase (Parafina) y agua (Calor sensible).....	21
Figura 8. Evolución histórica del rendimiento de aceite de palma en Colombia.	27
Figura 9. Evolución de las exportaciones y producción de aceite de palma en Colombia	28
Figura 10. Diagrama de proceso de refinación física.	31
Figura 11. Diagrama de proceso de refinación química.	32
Figura 12. Porcentaje de transmitancia en función de la longitud de onda absorbida de cada muestra estudiada	37
Figura 13. Porcentaje de pérdida de peso en función de la temperatura de cada material. estudiado	38

Lista de Apéndices

Apéndice A. Cotizaciones de parafina y estearina de palma.	53
Apéndice B. Análisis FTIR de los materiales estudiados	55
Apéndice C. Análisis TGA de los materiales estudiados	56
Apéndice D. Análisis DSC de los materiales estudiados.....	56
Apéndice E. Análisis DSC para el cálculo de Cp de cada muestra estudiada	56

Resumen

Título: Evaluación del potencial de la estearina de palma hidrogenada para su uso como material de cambio de fase

Autor: Aslhey Gissela Chinome Chinome y María Alejandra Sánchez Sepúlveda

Palabras clave: PCM, estearina, almacenamiento de calor, energía solar

Descripción:

En el presente trabajo se evaluó el potencial de la estearina de palma hidrogenada para su uso como material de cambio de fase (PCM), mediante el estudio de la oferta nacional de estearina de palma con base en datos secundarios del sector palmero en Colombia. Adicionalmente, se caracterizaron las propiedades térmicas y fisicoquímicas de la estearina de palma y estearina de palma hidrogenada, lo cual permitió comparar el desempeño térmico de estas materias primas con el de otros materiales orgánicos de cambio de fase (Soap Stock de soya y cera de parafina) en un escenario teórico.

Los resultados indican que la producción actual de estearina en Colombia es de aproximadamente 464.311,75 toneladas por año, lo que a su vez le otorga un precio de mercado competitivo respecto al de la parafina (PCM más empleado actualmente), debido a que el precio por kilogramo de estearina de palma hidrogenada es de \$10.400 y el de la cera de parafina es de \$11.500. Por otro lado, se evidenció que la estearina de palma hidrogenada posee la mayor densidad en estado sólido (1026 kg/m^3) de las muestras analizadas, lo cual representa mayor capacidad de acumulación energética en menor volumen. Además, se corroboró mediante Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier la predominancia de enlaces sencillos en la estearina hidrogenada y que esta modificación química mejora el desempeño de la estearina como PCM.

Finalmente se concluyó que hay disponibilidad y viabilidad económica de estearina de palma hidrogenada, siendo este un material promisorio, sustituto del PCM convencional actual. La estearina de palma hidrogenada cumple con las propiedades fisicoquímicas y térmicas requeridas (punto de fusión y de cristalización $59 \text{ }^\circ\text{C}$ y $43 \text{ }^\circ\text{C}$ respectivamente), las cuales se ven reflejadas en un mejor desempeño energético (270 kJ/kg), lo cual aporta a la transición energética y sostenibilidad ambiental del país.

Abstract

Title: Evaluation of the potential of hydrogenated palm stearin for use as a phase change material.

Author: Aslhey Gissela Chinome Chinome and María Alejandra Sánchez Sepúlveda.

Key Words: PCM, stearin, heat storage, solar energy

Description

In the present work, the potential of hydrogenated palm stearin for use as a phase change material was evaluated by the study of the national supply of palm stearin, based on secondary data from the palm sector in Colombia. Additionally, the thermal and physicochemical properties of palm stearin and hydrogenated palm stearin were characterized, which allowed the comparison of the thermal performance of these raw materials with that of other organic phase change materials (soybean Soap Stock and paraffin wax) in a theoretical scenario.

The results indicate that the current production of stearin in Colombia is approximately 464,311 tons per year, which in turn gives it a competitive market price with respect to paraffin wax (currently the most used PCM), since the price per kilogram of hydrogenated palm stearin is \$10,400 and that of paraffin wax is \$11,500. On the other hand, it was found that hydrogenated palm stearin has the highest density in solid state (1026 kg/m³) of the samples analyzed, which represents a greater capacity for energy accumulation in a smaller volume. In addition, it was corroborated by Fourier Transform Infrared Spectroscopy the predominance of single bonds in hydrogenated stearin and that this chemical modification improves the performance of stearin as PCM.

Finally, it was concluded that there is availability and economic viability of hydrogenated palm stearin, being this a promising material, substitute of the current conventional PCM. Hydrogenated palm stearin meets the required physicochemical and thermal properties (melting and crystallization points 59 °C and 43 °C respectively), which are reflected in a better energy performance (270 kJ/kg), which contributes to the energy transition and environmental sustainability of the country.

Introducción

El crecimiento demográfico y el acelerado proceso de industrialización han intensificado la demanda energética mundial, que migra desde actividades de baja intensidad energética a actividades de alta intensidad como la construcción y la industria. De acuerdo con el tipo de energía utilizada por el sistema, se define la matriz energética que puede estar conformada por energías renovables como no renovables. Las fuentes no renovables se caracterizan por ser finitas y con un impacto negativo sobre el medio ambiente (Cortés y Arango, 2017). Por esto, en los últimos años se ha incrementado el interés por incorporar energía eólica, hidráulica y solar en el sistema.

El aprovechamiento de la energía solar se realiza mediante colectores térmicos (calor) o paneles fotovoltaicos (electricidad) (Zalamea y Quesada, 2017). Unas de las aplicaciones más conocidas de los colectores solares es el calentamiento de agua sanitaria, empleándose sistemas que acumulan calor sensible (sin cambio de fase) o calor latente (con cambio de fase) en un tanque. Para el almacenamiento de calor latente, se emplean materiales de cambio de fase (PCM) los cuales son sustancias con un calor de fusión adecuado para la aplicación y un elevado valor de entalpía de fusión. Los PCM se clasifican principalmente en inorgánicos y orgánicos (García, 2013). Estos últimos tienen una capacidad de fusión congruente sin separación de fases, por ejemplo, las parafinas, los ácidos grasos, los alcoholes y los glicoles (Bravo, 2018).

A pesar de la versatilidad de las propiedades térmicas de los PCM orgánicos, aquellos de origen agroindustrial no se han implementado ampliamente en sistemas de almacenamiento de energía térmica debido principalmente a su alto costo (Oliver et al., 2012). Por ello, la búsqueda de PCM orgánicos renovables, de bajo precio y abundantes es una contribución relevante en el área; Dicha búsqueda permite además la investigación de subproductos autóctonos

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

agroindustriales que cumplan con las propiedades requeridas para su aplicación como PCM en el campo solicitado.

Uno de los subproductos de la agroindustria colombiana es la estearina de palma, proveniente de la refinación de aceite de palma, la cual puede someterse a hidrogenación para saturar sus enlaces y aumentar su punto de fusión, modificaciones que la hacen más apta para su uso como material de cambio de fase. Por consiguiente, en el presente trabajo se busca evaluar el potencial de la estearina de palma hidrogenada para su uso como PCM en aplicaciones de energía solar térmica, comparándola con la cera de parafina y el soapstock de soya.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general

Evaluar el potencial de la estearina de palma hidrogenada para su uso como material de cambio de fase.

1.2. Objetivos específicos

Establecer la oferta nacional de estearina de palma con base en datos secundarios del sector palmero en Colombia.

Caracterizar las propiedades térmicas y fisicoquímicas de la estearina de palma y estearina de palma hidrogenada.

Comparar el desempeño térmico de la estearina de palma y estearina de palma hidrogenada con el de otros materiales orgánicos de cambio de fase en un escenario teórico.

2. Marco Teórico

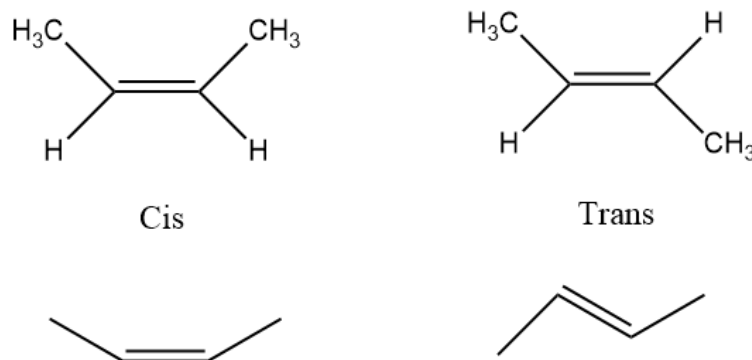
2.1. Hidrogenación de grasas y aceites vegetales

Los aceites y grasas vegetales están compuestos en su mayor proporción por triglicéridos, ácidos grasos libres y por otras sustancias como fosfátidos, esteroides y carotenos (O'Brien, 2003). Si un triglicérido pierde un átomo de hidrógeno, el átomo de carbono queda con un electrón desapareado, donde se genera un radical carbonilo libre el cual reaccionará con el oxígeno y producirá la peroxidación lipídica del aceite (Colomer, 2003). Para estabilizar a los radicales libres, se requiere de la adición de hidrógeno para formar puentes de hidrógeno entre dos grupos cercanos (Rice et al., 1996).

La hidrogenación de aceites vegetales es un proceso industrial fundamental para aumentar la estabilidad oxidativa (Choo et al., 2003), este proceso puede transformar ácidos poliinsaturados en ácidos saturados, por otro lado, durante la adición de hidrógeno, en las cadenas de ácidos grasos, los dobles enlaces pueden dar configuraciones *cis* o *trans*, las cuales influyen en el punto de cristalización (Sarno et al., 2021). La **figura 1** muestra las configuraciones *cis* y *trans* de una molécula.

Figura 1.

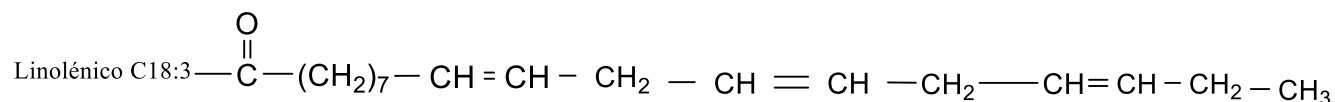
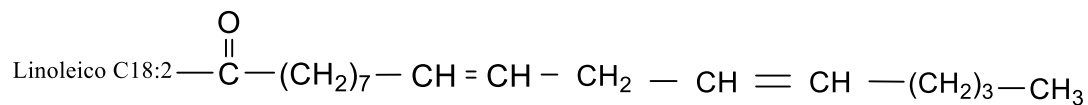
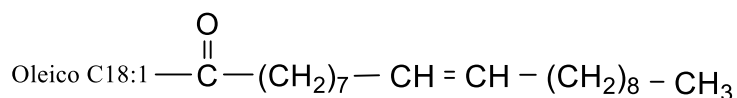
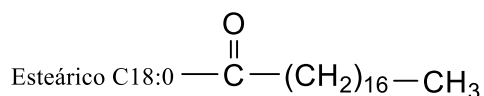
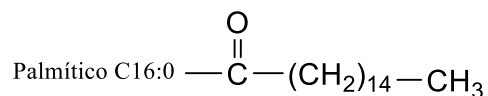
Configuración cis y trans



USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

El proceso consiste en una serie de reacciones llevadas a cabo en un reactor discontinuo donde se utilizan principalmente catalizadores de Ni soportados, como resultado se pueden obtener una variedad de productos. Un buen catalizador se caracteriza por tener buena actividad, selectividad, resistencia al envenenamiento y filtrabilidad (Balakos & Hernández, 1997).

La hidrogenación disminuye el contenido oleico de los aceites, aumenta las características de fusión y mejora la estabilidad oxidativa; por lo tanto, aumenta los niveles de ácidos grasos saturados (Cheng, et al., 2012). En la **figura 2**, se observan los ácidos grasos más comunes presentes en los aceites vegetales.

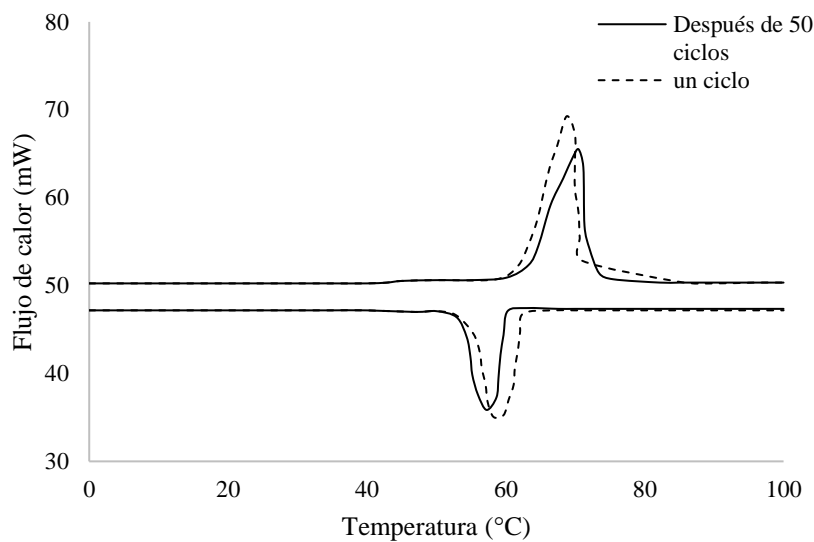
Figura 2.*Ácidos grasos presentes en aceites vegetales*

Nota. Adaptado de (Balakos & Hernández, 1997)

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

2.2. Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

La calorimetría diferencial de barrido, o como comúnmente se conoce por sus siglas en inglés DSC (Differential Scanning Calorimetry), es un método experimental dinámico, importante en el campo de la ciencia de los materiales debido a su elevado grado de sensibilidad y a su rápida velocidad de análisis. El DSC permite determinar la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia, cuando es sometida a una temperatura constante, durante un tiempo determinado o cuando es calentada o enfriada a velocidad constante en un determinado intervalo de temperaturas (Suriñach et al., 1992, p.11). Esta técnica es implementada para el estudio del comportamiento de fusión y de cristalización (Gottschalk et al., 2018). El sistema de cómputo del equipo da como resultado datos de flujo de calor y temperatura a la que fue sometida la muestra, se procede a graficar el flujo de calor en función de la temperatura y se obtienen gráficos como el de la **figura**

3.**Figura 3.***Flujo de calor en función de la temperatura*

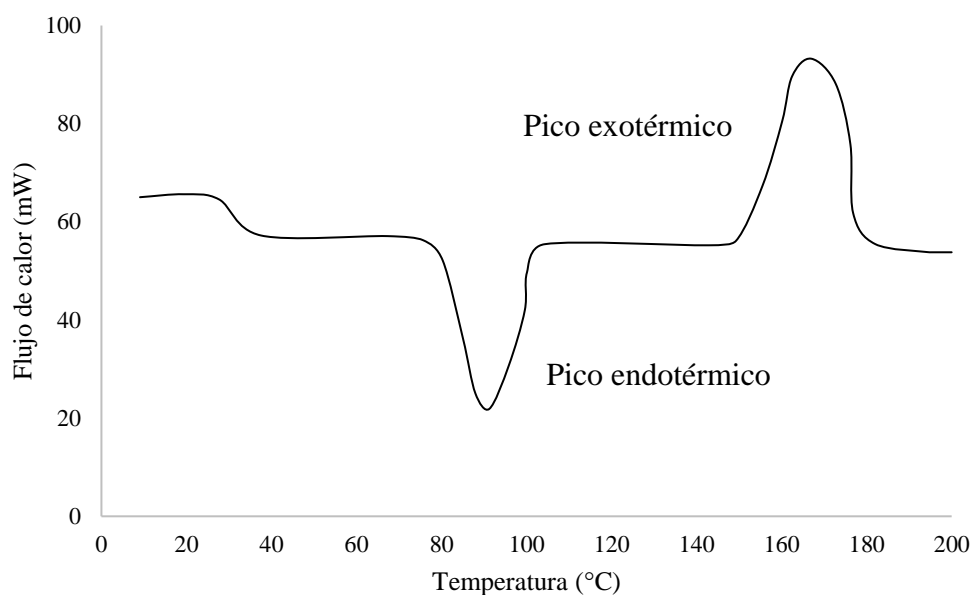
Nota. Adaptado de (Huang et al., 2017)

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Para determinar la entalpía de fusión se debe calcular el área de la curva endotérmica; y a su vez, para la entalpía de cristalización, el área de la curva exotérmica (JoVE Science Education Database, 2022). Cuando la reacción es exotérmica o endotérmica las gráficas tienen un comportamiento característico, como se muestra en la **figura 4**.

Figura 4.

Esquema de una curva de resultados de DSC



Nota: Adaptado de (Beatty & Sparks, 2022).

2.3. Análisis termogravimétrico (TGA)

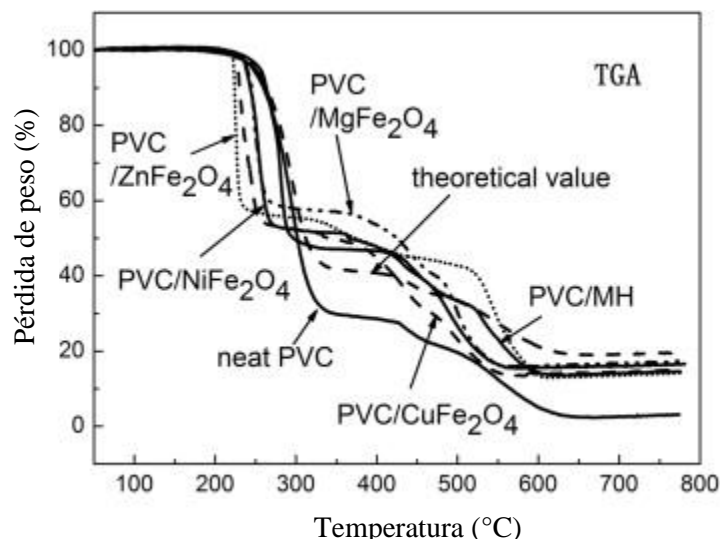
El TGA es un método común de análisis térmico que se utiliza para estudiar la transformación de fase en el cambio de temperatura. El TGA determina el cambio de masa de una muestra con respecto al aumento de temperatura, que a su vez refleja reacciones físicas y químicas, como la absorción, desorción, descomposición y oxidación entre otras (Yang & Hedin, 2022). El funcionamiento del equipo se basa en el cambio de masa de la muestra con el cambio de temperatura o tiempo como se muestra en la **figura 5**. Un instrumento para realizar un análisis

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

termo gravimétrico consta de un plato que reposa sobre una balanza analítica, en el cual se coloca la muestra y se calienta externamente (Basu, 2018).

Figura 5.

Curvas TGA de una muestra de PVC



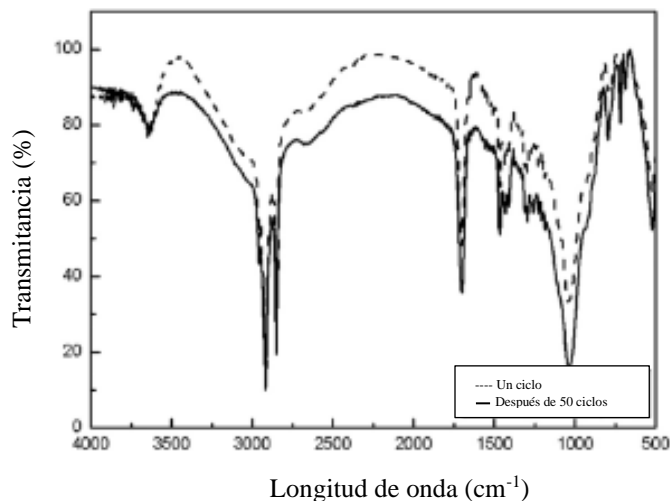
Nota. Adaptado de (Jianzhong et al., 2013)

2.4. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) implica la absorción de radiación infrarroja por parte de la muestra, esta genera como resultado vibraciones moleculares por los enlaces químicos de los compuestos (Mayo et al., 2004). La FTIR es un método analítico establecido para investigar la composición química de materiales orgánicos o inorgánicos, junto con el análisis de los enlaces, la estructura y los fenómenos de interfaz (Kubasch et al., 2011).

Un espectrofotómetro puede medir que frecuencias se absorben, generalmente se representa con un espectro de radiación IR transmitida a través de la muestra a una frecuencia dada en longitud de onda. En este tipo de espectro los picos se invierten ya que representan una disminución de la luz transmitida (JoVE Science Education Database, 2022), como se muestra en la **figura 6**.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Figura 6.*Espectro FT-IR de una muestra de ácidos grasos eutécticos*

Nota. Adaptado de (Huang et al., 2017)

La vibración molecular se logra observar cuando se produce un cambio global en el dipolo de la estructura de la molécula de la muestra, cada uno de estos cambios se observan en regiones de frecuencia específicas que dependen de su estructura química (Mayo et al, 2004).

2.5. Estado del arte

En los últimos años se ha incrementado el interés por la investigación de los acumuladores de energía solar térmica (TESS por sus siglas en inglés) que usan algún material de cambio de fase (PCM) para mejorar su eficiencia (Iten et al., 2016). Los TESS con PCM son una alternativa potencial, principalmente en la calefacción de espacios y el calentamiento de agua, y brindan una reducción en el consumo de combustible y emisiones de CO₂ entre (5,00 - 11,97) % en comparación con la solución clásica sin PCM (Pop et al., 2021). El almacenamiento de calor en un PCM se basa en la entalpía de cambio de fase del material, que opera en un rango de temperatura estrecho, por lo que proporciona una mayor densidad de energía en comparación con la que se puede lograr en el almacenamiento de calor sensible para el mismo gradiente de temperatura (Pereira da Cunha et al., 2016).

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

En la literatura, se reportan algunos pilotos experimentales de sistemas acumuladores térmicos. En el Centro de Investigación y Tecnología para la Energía en Túnez, se diseñó y construyó un secador que utiliza un material de cambio de fase, con el propósito de observar la viabilidad de un calentador de aire solar con PCM para almacenar la energía solar durante el día y liberarla durante la noche. Los resultados mostraron que la eficiencia energética diaria del acumulador de energía solar alcanzó el 33,9% con PCM, mientras que para el caso sin PCM la eficiencia energética diaria era del 8,5% (Khadraoui et al., 2017).

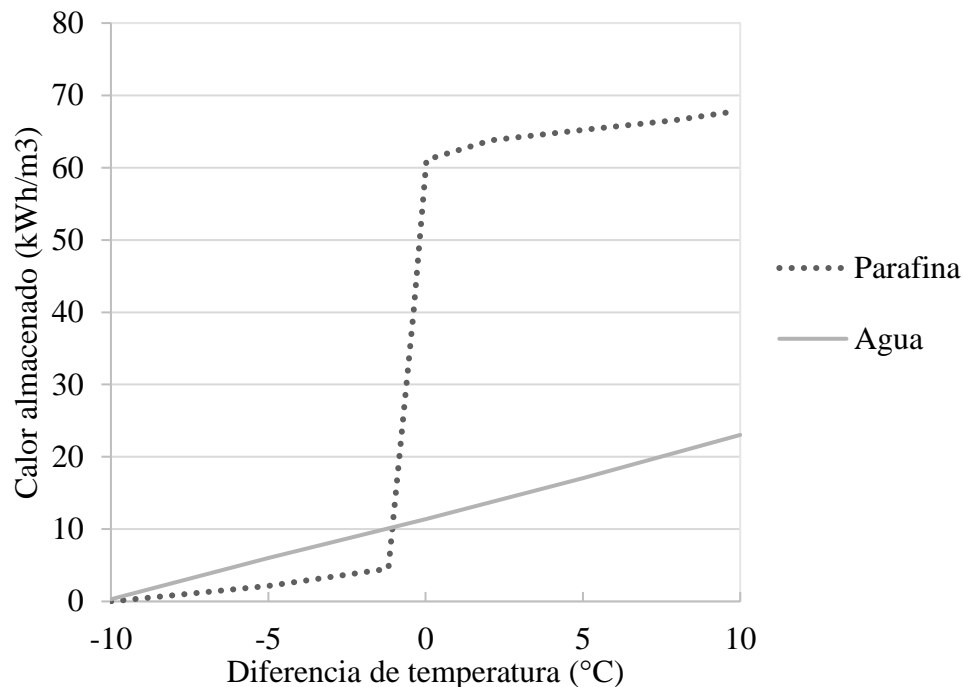
En Colombia, se diseñó, construyó y validó un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, en el cual se utilizó material de cambio de fase (PCM) de origen petroquímico como fuente de almacenamiento térmico, para el secado de yuca a pequeña escala. El sistema híbrido consiste en un ventilador centrífugo, dos colectores solares, un quemador de combustible sólido (cascarilla de arroz) y un secador de bandejas. La eficiencia correspondiente a los colectores solares alcanzó un 43,91% y la del quemador de cascarilla de arroz alcanzó un 36,72% (Torres-Gallo et al., 2017).

Actualmente, el material de cambio de fase convencional es la cera de parafina, la cual tiene un bajo costo, densidades de almacenamiento térmico moderadas y un amplio rango de temperaturas de fusión que dependen de su composición (Reyes et al., 2015). La **figura 7** permite comparar el comportamiento de un material que presenta cambio de fase (Parafina) con un material que no presenta cambio de fase (Agua) y que solo almacena calor sensible. Ambos materiales a medida que almacenan calor incrementan su temperatura a una velocidad prácticamente constante; sin embargo, hay un punto en donde la parafina mantiene su temperatura, mientras ocurre el cambio de fase y después varía nuevamente.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Figura 7.

Calor Almacenado en función de la temperatura, para un material de cambio de fase (Parafina) y agua (Calor sensible).



Nota. Adaptado de (Pereira da Cunha et al., 2016)

Este comportamiento de cambio de fase en las condiciones de operación de la mayoría de los sistemas de aprovechamiento de energía solar térmica que operan en temperaturas entre los 20 °C y los 90 °C puede obtenerse con el uso de estearina de palma como PCM. La estearina de palma, al igual que otros ácidos grasos de origen vegetal, es un material promisorio en la aplicación de materiales de cambio de fase (PCM) debido a sus características fisicoquímicas y su producción actual en Colombia (Fedepalma, 2022). La estearina de palma RBD (por sus siglas en inglés Refined Bleached Deodorized), de consistencia sólida blanca, se obtiene mediante fraccionamiento en seco de aceite de palma totalmente refinado y desodorizado. A continuación, se muestran las características de los diferentes grados de estearina de palma en la **tabla 1**.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Tabla 1.*Características de los diferentes grados de estearina de palma*

Grados Características	Estearina Dura	Estearina Semidura	Estearina Suave
Valor Yodo (V.Y)	< 30	30 - 40	40 - 48
Punto de fusión	> 54 °C	53,6 – 51,5 °C	-
Concentración volumétrica	> 51	51 - 49	49 - 46
Valor INS	176 - 71	171 - 160	160 - 145
Composición ácidos grasos (%) saturados	> 70	64,9 – 70,0	55,8 – 60,8
Mono - insaturados	17,5 – 23,7	13,8 – 18,1	31,0 – 35,1
Di - insaturados	3,6 – 5,4	5,5 – 6,8	7,8 – 8,9
Tri - insaturados	0,1 – 0,2	0,3 – 0,2	0,3 – 0,3

Nota: Tomado de (Unipalma, 2022).

Para la selección de un material de cambio de fase (PCM) se debe cumplir con ciertas propiedades térmicas, físicas, cinéticas, químicas y económicas. Como se muestra a continuación en la **tabla 2**.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Tabla 2.*Propiedades térmicas, físicas, cinéticas, químicas y económicas deseadas en los PCM.*

Térmico	Físico	Cinético	Químico	Económico
T PC adecuado	Alta densidad	ΔT bajos	Estabilidad prolongada	Bajo costo
Alto calor latente	Presión de vapor baja	Tasa adecuada de cristalización	No tóxico	Ampliamente disponible
Alta conductividad térmica	Bajos cambios de volumen	-	No corrosivo	-
Alto calor específico	-	-	No inflamable o explosivo	-

Nota: Adaptado de (Rodríguez-Cumplido et al., 2019).

Entre los parámetros a considerar para el funcionamiento óptimo de los sistemas de almacenamiento de calor latente, el PCM debe tener un calor latente de fusión relativamente alto, estabilidad en su proceso de fusión, ser químicamente inerte con su contenedor, tener un bajo grado de subenfriamiento. Sin embargo, una de las principales desventajas de los PCM de uso común es su baja conductividad térmica, generalmente entre 0,2 y 0,7 (W / m • K) (Jegadheeswaran et al., 2009). Una forma de obtener materiales de cambio de fase con la mayoría de dichas propiedades fisicoquímicas es mediante la hidrogenación de aceites y grasas vegetales. Dichos aceites líquidos se transforman en sólidos fácilmente manejables que permiten un aumento de temperatura de fusión en los materiales; y, por tanto, un aumento en su estabilidad química, lo cual los hace menos susceptibles a oxidación natural (Jovanovic et al., 1998). Si bien, se puede encontrar una extensa literatura relacionada con la aplicación de hidrogenación en aceites y grasas vegetales para aplicaciones en la industria de alimentos, son escasos los trabajos enfocados en la producción de materiales de cambio de fase.

3. Metodología

La metodología requirió de tres fases para la ejecución del proyecto, estas fueron el establecimiento de la oferta potencial de estearina de palma en Colombia, la caracterización de las propiedades térmicas y determinación de la densidad de la estearina de palma y por último la comparación del desempeño térmico de la estearina de palma con otros PCM. El establecimiento de la oferta potencial tuvo dos actividades: el análisis del proceso de refinación agroindustrial de aceite de palma en Colombia y el análisis económico de la estearina de palma y de la parafina (PCM convencional en la industria). La siguiente fase constó de dos actividades las cuales fueron la determinación de la densidad de la estearina de palma en estado sólido y líquido y la estimación de propiedades térmicas como la temperatura y entalpía de fusión, temperatura y entalpía de cristalización, estabilidad térmica y capacidad calorífica de sólido y líquido. Por último, la comparación del desempeño térmico de la estearina de palma con otros PCM se hizo mediante el cálculo de la capacidad de almacenamiento de energía térmica.

3.1. Establecimiento de la oferta potencial de estearina de palma con base en datos secundarios del sector palmero en Colombia.

A partir de datos secundarios, se analizó el proceso de refinación agroindustrial que involucra aceite de palma en Colombia, con el propósito de estimar la producción de estearina de palma. Se identificaron las cadenas de valor más relevantes del sector palmero, resaltando los usos actuales de la estearina de palma. Posteriormente, se comparó económicamente la estearina de palma respecto a la parafina (PCM convencional), con base en cotizaciones comerciales.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

3.2. Caracterización de las propiedades térmicas y fisicoquímicas de la estearina de palma y de otros PCM.

3.2.1. Estimación de propiedades fisicoquímicas

Se obtuvo una muestra comercial de soapstock de soya, dos de estearina de palma, una de cera de parafina y una de estearina de palma hidrogenada. Esta última muestra se obtuvo de una empresa que realiza maquilas de hidrogenación bajo pedido. Para todas las muestras se determinó la densidad en estado líquido (NTC 336, 2016) y en estado sólido por medio del cálculo de cociente de la masa entre el volumen ocupado, el cual fue determinado mediante desplazamiento de volumen. Adicionalmente, se determinó la composición morfológica de las muestras por medio de FTIR.

3.2.2. Estimación de propiedades térmicas: Temperatura y entalpía de fusión, temperatura y entalpía de cristalización, estabilidad térmica y capacidad calorífica de sólido y líquido.

Para todas las muestras se determinó la temperatura de fusión y de cristalización mediante Calorimetría diferencial de barrido (DSC), también la entalpía de fusión y de cristalización, ambas técnicas se realizaron según la norma ASTM D3418-21, la capacidad calorífica (ASTM E1269-11, 2018) y la estabilidad térmica mediante análisis termogravimétrico (ASTM E1131-20).

3.3. Comparación del desempeño térmico de la estearina de palma con otros materiales de cambio de fase.

Se comparó el desempeño térmico de la estearina de palma hidrogenada con el de los otros materiales, mediante el cálculo del almacenamiento térmico, el cual depende principalmente de la capacidad térmica del material; por lo tanto, la energía almacenada por un cuerpo entre dos temperaturas inicial (T_0) y final (T_1) del proceso de calentamiento se representa mediante la Ecuación 1 (Sáiz, 1991).

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

$$E = \int_{T_0}^{T_1} m * C_{pS} dT + m * \Delta H_{fusión} + \int_{T_2}^{T_3} m * C_{pL} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde $\Delta H_{fusión}$ es la entalpía de fusión

4. Resultados

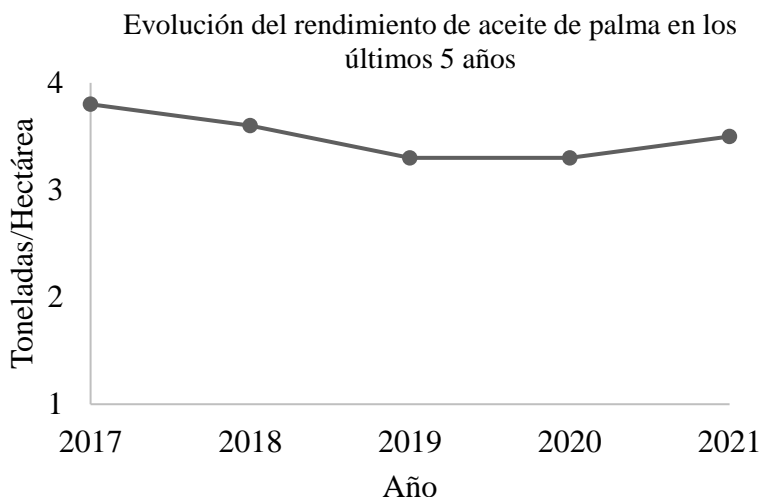
4.1. Establecimiento de la oferta potencial de estearina de palma con base en datos secundarios del sector palmero en Colombia.

Según la Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (Fedepalma, 2021), Colombia es el primer país productor de aceite de palma en América y el cuarto productor en el mundo. Actualmente la especie oleaginosa más productiva del planeta es la *Elaeis guineensis*, debido a que una hectárea sembrada puede llegar a producir hasta 6 toneladas de aceite por año, lo que equivale entre seis a diez veces más aceite que las demás especies (Bernal, 2005). Sin embargo, en Colombia el máximo rendimiento hasta ahora registrado ha sido de 3,8 toneladas de aceite por hectárea sembrada. La **figura 8** muestra la evolución histórica del rendimiento de aceite de palma en los últimos 5 años.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Figura 8.

Evolución histórica del rendimiento de aceite de palma en Colombia.



Nota: Adaptado de (Fedepalma, 2022).

El mayor rendimiento de aceite de palma por hectárea sembrada en los últimos 5 años se obtuvo en el año 2017, el cual fue de 3,8 Toneladas/Hectárea, para el año 2018 y 2019 se registró un decrecimiento del 5,26% y 13,16% respectivamente, se mantuvo constante en el año 2020 y en el año 2021 aumentó hasta un rendimiento de 3,5 Toneladas/Hectárea.

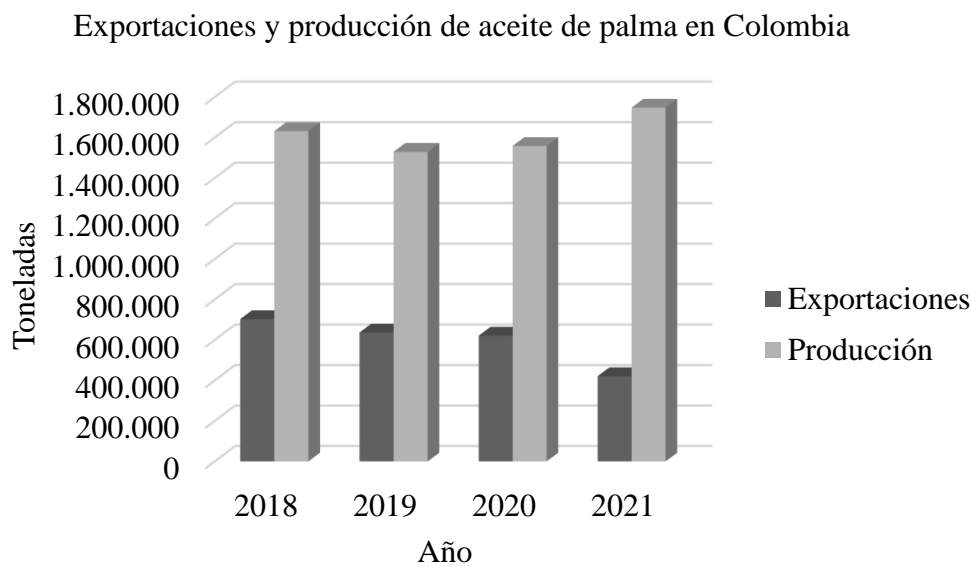
En el año 2021 la producción total de aceite de palma fue de 1'747.700 toneladas (Federación Nacional de Cultivadores de Palma [Fedepalma], 2022). Las exportaciones en el año 2021 fueron de 421.095 toneladas y no hay importaciones de aceite de palma en bruto (código de arancel 1511100000), debido a que Colombia es un país potencial productor y las importaciones registradas a la fecha hacen referencia a otros tipos de aceites refinados (LegisComex, 2021). Lo anterior permite calcular el aceite en bruto procesado en el país, el cual fue de 1'326.605 toneladas, este se asume que fue refinado en su totalidad.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

La **figura 9** muestra la evolución de las exportaciones y de la producción de aceite de palma en Colombia.

Figura 9.

Evolución de las exportaciones y producción de aceite de palma en Colombia



Nota. Adaptado de (Fedepalma, 2022; LegisComex, 2022)

La evolución de las exportaciones de aceite de palma desde el año 2018 hasta el año 2021 han disminuido, mientras que la producción tuvo un descenso en el año 2019 pero incrementó hasta obtener la mayor producción registrada, la cual se dio en el año 2021.

Por otro lado, los aceites deben ser tratados antes de llegar al consumidor, para así eliminar el mayor porcentaje de contenido de ácidos grasos libres, fosfátidos y otros compuestos que perjudican la calidad del aceite. El aceite de palma contiene un porcentaje de ácidos grasos libres considerable, y para reducirlo este debe ser refinado. Existen dos tipos de refinación de aceites crudos, la refinación física y la refinación química, el aceite de palma generalmente se refina mediante el proceso físico, este se prefiere al proceso químico, por la alta acidez que puede

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

provocar una pérdida excesiva de aceite neutro en la pasta de jabón después de la neutralización alcalina (Gibon et al., 2007).

“El refinado físico se desarrolló originalmente para los aceites con alto contenido en ácidos grasos libres (como el aceite de palma), para los que el refinado químico no es económicamente atractivo. El refinado físico da lugar a productos secundarios más fácilmente valorizables (por ejemplo, el destilado desodorizante), pero generalmente requiere un aceite crudo de mejor calidad. Dado que la mayoría de los aceites vegetales necesitan ser refinados (al menos parcialmente) para aplicaciones comestibles o técnicas, la producción ha dado lugar a una importante expansión de la industria de refinado de aceites” (Hamm et al., 2009, p.131)

Adicionalmente, de los diferentes procesos de refinación química el más convencional, utilizado y conocido es el de sosa cáustica. Sin embargo, con los parámetros correspondientes de calor, tiempo y el exceso de sustancias básicas, también puede provocar la saponificación de una parte del aceite neutro. (O'Brien, 2009).

Según la literatura, los aceites híbridos, como es el caso del aceite denominado “Fortuna”, tienen un bajo porcentaje de estearina de palma y es consecuencia de un alto contenido de ácido graso oleico, a comparación de los aceites vegetales que no son híbridos como es el caso del aceite de palma, que tiene un alto contenido de estearina gracias a su menor porcentaje de ácido oleico. Lo anterior se puede evidenciar en la **tabla 3**.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Tabla 3.

*Comparación del perfil de ácidos grasos del aceite de palma y el aceite híbrido interespecífico de *Elaeis oleifera* Coari y *Elaeis guineensis*.*

Ácidos Grasos	Aceite de palma NTC 431		Aceite híbrido
	(%)	Rango	(%)
C12:0 Láurico	0,4	0,4	0
C14: Mirístico	1,25	0,5 -2	0,16
C16:0 Palmítico	44	41- 47	23,9
C16:1 Palmitoleico	-	<0,6	0,29
C18:0 Esteárico	4,750	3,5- 6	2,62
C18:1 Oleico	40	36 -44	59
C18:2 Linoleico	10	8 -12	11,92
C18:3 Linolénico	-	< 0,5	0,38
C20:0 Araquídico	-	< 0,1	0,33

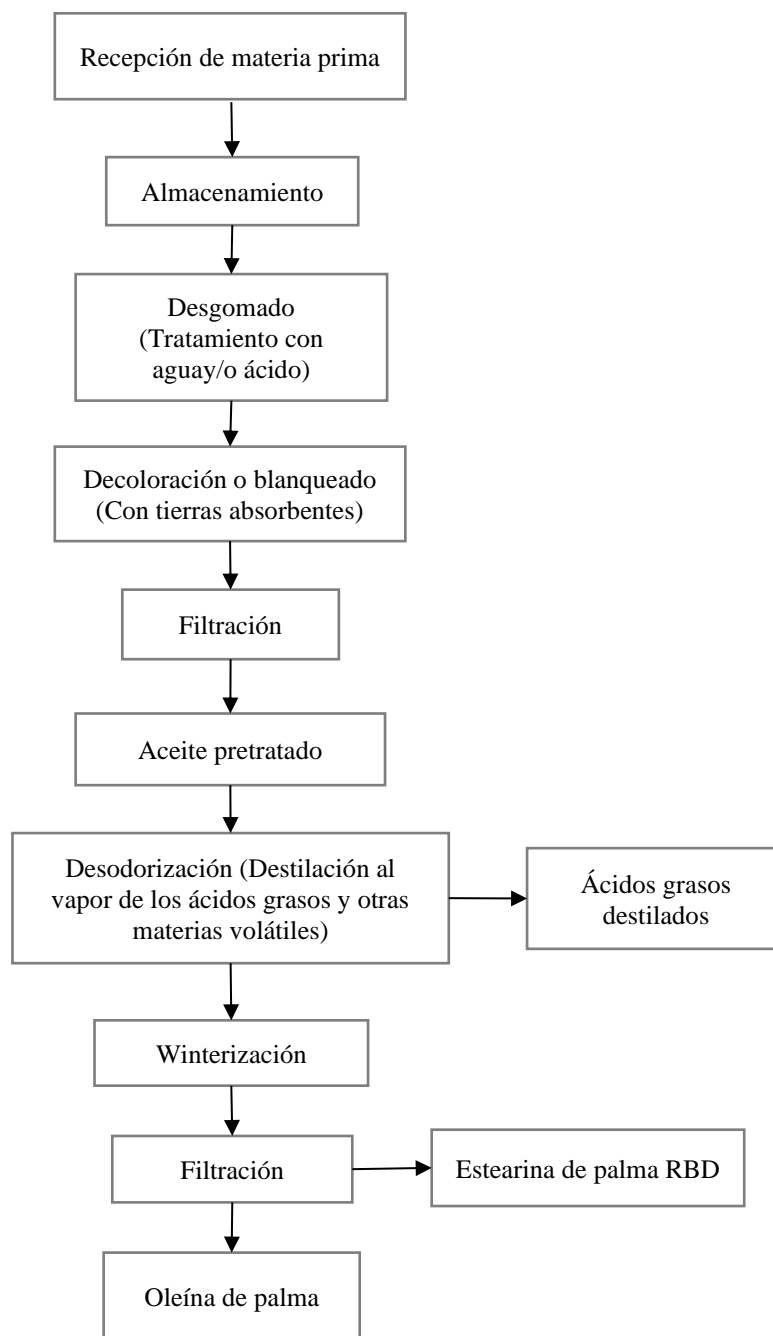
Nota: Adaptado de (Herrera et al., 2019)

O'Brien también señala que el refinado físico de aceite de palma suele tener un alto contenido de ácidos grasos libres, bajo contenido de goma y fosfátidos. Por otro lado, el sistema de refinación química consiste principalmente de la etapa de neutralización cáustica (etapa que hace la diferencia entre el proceso de refinando físico y el proceso de refinado químico), en donde los aceites vegetales con alto contenido de fosfátidos o fosfolípidos dan lugar a la sustancia jabonosa denominada soap stock. La eliminación de este residuo conlleva un proceso altamente costoso anteriormente mencionado, debido a que el rendimiento de este método es relativamente bajo, principalmente por pérdidas de aceite neutro durante el proceso, en consecuencia, a la emulsión y saponificación de los aceites neutros (Hegsted et al., 1997). Las **figuras 10** y **11** muestran el proceso de refinación física y química respectivamente. En conclusión, el proceso de refinación física se aplica principalmente a aceites como el de palma, generando un aceite refinado con hasta 45% de grasas saturadas, mientras que el proceso de refinación física se aplica a aceites como el de soya, generando soapstock como subproducto.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Figura 10.

Diagrama de proceso de refinación física.

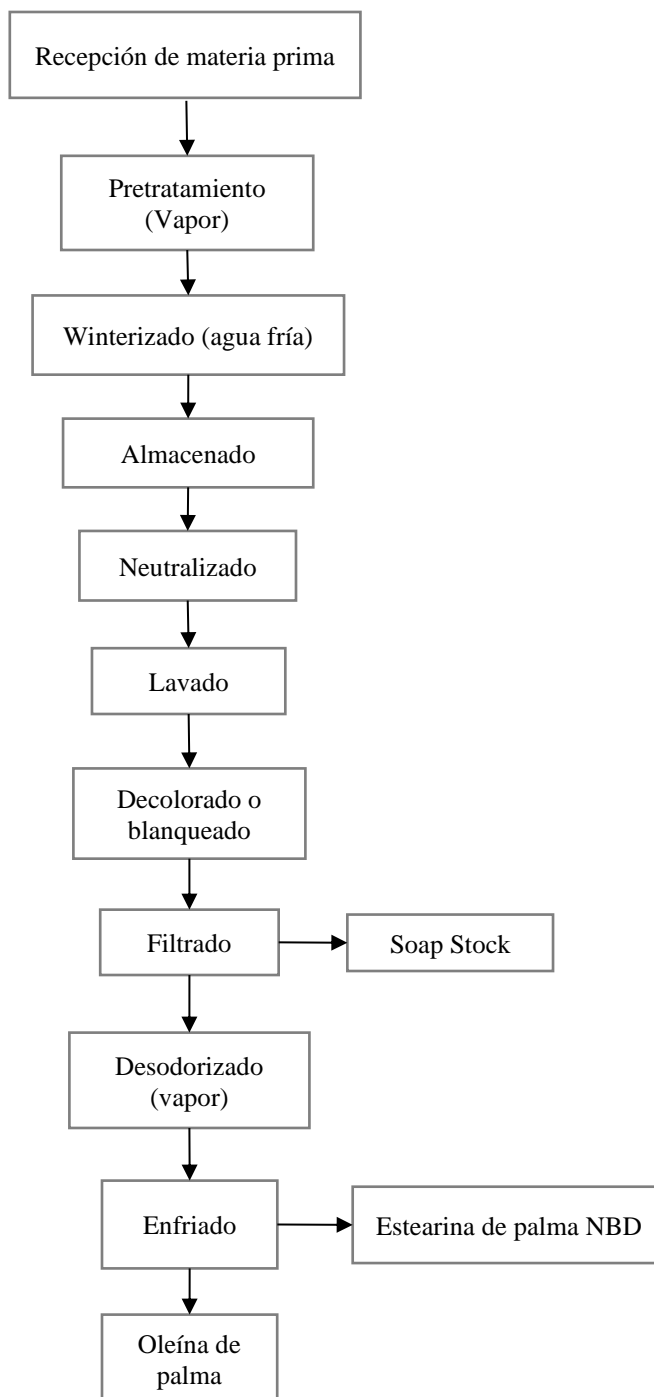


Nota. El diagrama representa las etapas correspondientes al proceso de refinación física del aceite de palma. Los rangos del rendimiento de oleína y estearina de palma son 65%-85% y 15%-35% respectivamente. Adaptado de (Lorena et al., 2017; Chandrasekharan et al., 1999)

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Figura 11.

Diagrama de proceso de refinación química.



Nota. El diagrama representa las etapas correspondientes al proceso de refinación química del aceite de palma. Adaptado de (Lorena et al., 2017).

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

El rendimiento de la estearina y la oleína producto del proceso de refinación de aceite de palma crudo, depende principalmente de la naturaleza de la materia prima que involucra tres factores importantes como el índice de yodo, el contenido de ácido oleico, y el sistema de separación en la etapa de fraccionamiento. El 95% del aceite de palma se trata mediante el fraccionamiento (que separa los componentes líquidos y sólidos de la materia por cristalización) y corresponde a la etapa final del proceso de refinación en la cual hay filtro prensas que dejan pasar más porcentaje de oleína o de estearina de palma dependiendo de las necesidades del mercado (Diemme Filtration, 2010). Por otro lado, el método de refinación es otro factor que incide tanto en el porcentaje de pérdida de aceite crudo y rendimiento de la estearina de palma.

Actualmente las empresas extractoras entregan el aceite crudo de palma con un porcentaje máximo de ácidos grasos del 3,5%; sin embargo, las empresas refinadoras para el tratamiento del aceite de palma por el método físico sugieren que el contenido de estos ácidos grasos esté por debajo de 3%, de lo contrario se recomienda tratar el aceite por el método de refinación química (Ooi et al., 1996).

Para este estudio independientemente del método de refinación, en la etapa de fraccionamiento el rendimiento de la estearina de palma en función del aceite crudo es del 35 % (Nusantoro, 2016). Ahora, teniendo en cuenta los datos anteriormente mencionados de producción, exportación y refinación de aceite de palma en Colombia, se puede deducir que la estearina producida en el año 2021 fue de aproximadamente de 464.311,75 toneladas al año. Esto, asumiendo que en su totalidad la producción de aceite de palma crudo que se refinó en el país se trató por el método de refinación física que corresponde a la modificación de ácidos, blanqueamiento y desacidificación (Alfa Laval, 2021). El cálculo se puede observar a continuación:

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

$$1'747.700 \text{ ton} - 421.095 = 1'326.605 \text{ ton}$$

$$\textit{Producción de estearina de palma (2021)} = 1'326.605 * 35\% = 464.311 \text{ ton}$$

Algunas de las aplicaciones de esta estearina de palma RBD las podemos evidenciar principalmente en formulaciones de shortenings (Grasas Industriales), margarinas, en la fabricación de jabón y su aplicación en biocombustibles (Muñoz et al., 2017). Aproximadamente 30.000 toneladas de estearina de palma son utilizadas para la fabricación de jabón y de biocombustibles, lo cual corresponde al 6,46% de la producción total anual (2021) de estearina de palma en Colombia (Cadena, 2004).

Existen varias problemáticas en la aplicación actual de estearina de palma, principalmente en la industria de alimentos, su alto grado de saturación genera inconvenientes en la fabricación de grasas comestibles, debido a que implica una baja plasticidad en el producto final, por tanto, limita su comercialización (Theam et al., 2015). Asimismo, el aceite de palma y sus derivados tienen un inconveniente decisivo en comparación con los aceites vegetales convencionales (aceite de colza o de soja) por su alto contenido en ácidos grasos saturados, lo cual representa una preocupación desde el punto de vista de la salud, y por ende desfavorece su comercialización durante los próximos años (Matthäus, 2015).

Muchos alimentos procesados contienen aceites y grasas hidrogenadas o parcialmente hidrogenadas (PHO, por sus siglas en inglés), el cual es la principal fuente de grasas trans en los mismos. La FDA está tomando medidas para remover estas grasas trans del suministro de alimentos (Food and Drug Administration [FDA], 2015). Esta problemática evidencia la necesidad de diversificar las aplicaciones de los subproductos de refinación de aceite, especialmente la estearina de palma.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Ahora bien, respecto a los precios actuales de las materias primas y teniendo en cuenta el IVA del 19% (2022), el precio por kilogramo de estearina de palma, y estearina de palma hidrogenada es de \$7.300 y \$10.417 respectivamente. Por otro lado, el precio de la parafina, que es el PCM convencional, es de \$11.500 (Ver apéndice A).

Con estos precios referentes a los materiales se concluye desde el punto de vista comercial la factibilidad económica de la estearina de palma hidrogenada en su aplicación como material de cambio de fase.

4.2. Caracterización de las propiedades térmicas y fisicoquímicas de la estearina de palma.

La caracterización térmica y la determinación de la densidad de la estearina de palma se realizó en el laboratorio de la escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, para lo cual se estudiaron cinco muestras potenciales para su aplicación de PCM, con el propósito de estudiar el potencial de la estearina de palma hidrogenada. Se incluyó el Soap Stock de soya que, si bien es subproducto del aceite de soya, este tiene un alto contenido de grasas saturadas, el cual es el tercer aceite más refinado en el país. (Calderón y Nieto, 2018).

Los materiales que se estudiaron corresponden a las siguientes materias primas: Soap stock de soya (H1), estearina de palma semidura (H2), estearina de palma dura (H3), estearina de palma hidrogenada (H4), y Parafina (H5).

4.2.1. Estimación de las propiedades fisicoquímicas de la estearina de palma y estearina de palma hidrogenada.

En la **tabla 4** se exponen las densidades determinadas de cada muestra en estado líquido y sólido.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Tabla 4.

Densidades en estado sólido y líquido de cada material estudiado.

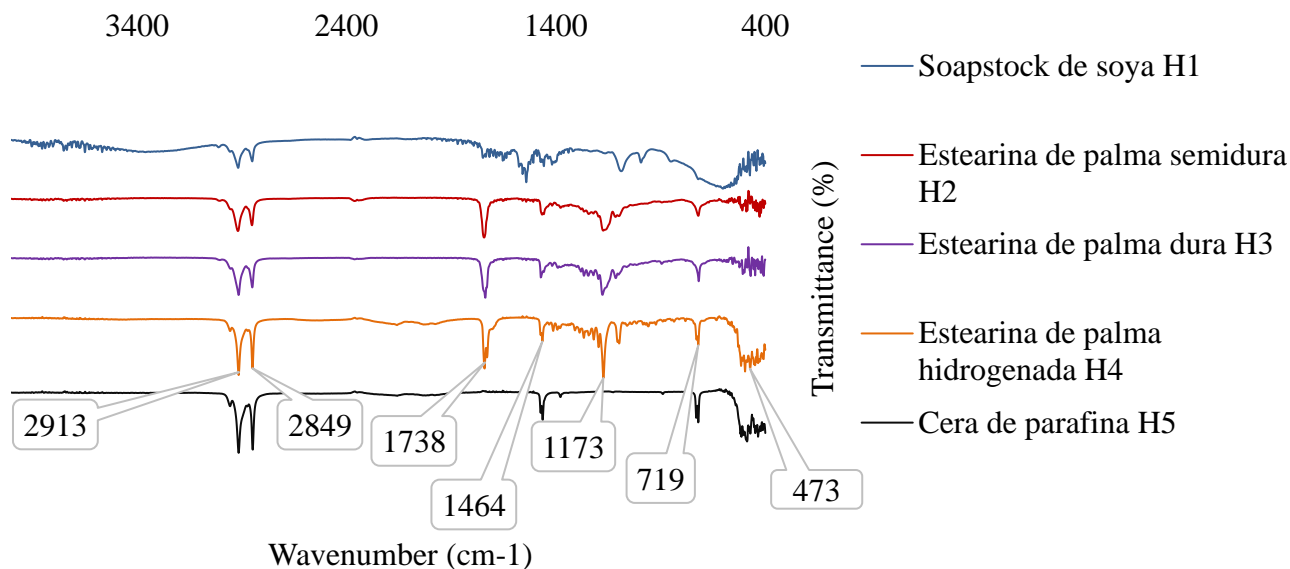
Muestra	Densidad sólida a temperatura ambiente (kg/m³)	Densidad líquida a 70°C (kg/m³)	Porcentaje de variación de la densidad (%)
Soapstock de soya H1	962	1022	5,9
Estearina de palma semidura H2	973	846	13
Estearina de palma dura H3	917	815	11
Estearina de palma hidrogenada H4	1026	820	20
Cera de parafina (origen petroquímico) H5	867	774	11

Según la tabla 4, se puede evidenciar que la estearina de palma hidrogenada posee la mayor densidad en estado sólido, lo cual representa mayor capacidad de acumulación energética en menor volumen. Es importante resaltar que también es la muestra que presenta el mayor cambio de densidad cuando pasa de estado sólido a estado líquido con un 20% de variación, factor que si bien no es un inconveniente, debe ser considerado en las etapas de diseño de los tanques de almacenamiento de calor.

Adicionalmente para el análisis de la composición morfológica de los materiales estudiados, se empleó Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (Reflectancia total atenuada) (Ver anexo B). En la **figura 12** se muestran los espectros FTIR de cada material estudiado

Figura 12.

Porcentaje de transmitancia en función de la longitud de onda absorbida de cada muestra



Como se observa en la **figura 12**, las estearinas de palma presentan absorbancia en el rango de 1500-400 cm⁻¹, en el cual se identifican los enlaces simples, siendo la estearina de palma hidrogenada la que evidencia los picos más altos (1173, 719 y 496 cm⁻¹) debido al proceso de hidrogenación que saturó sus enlaces.

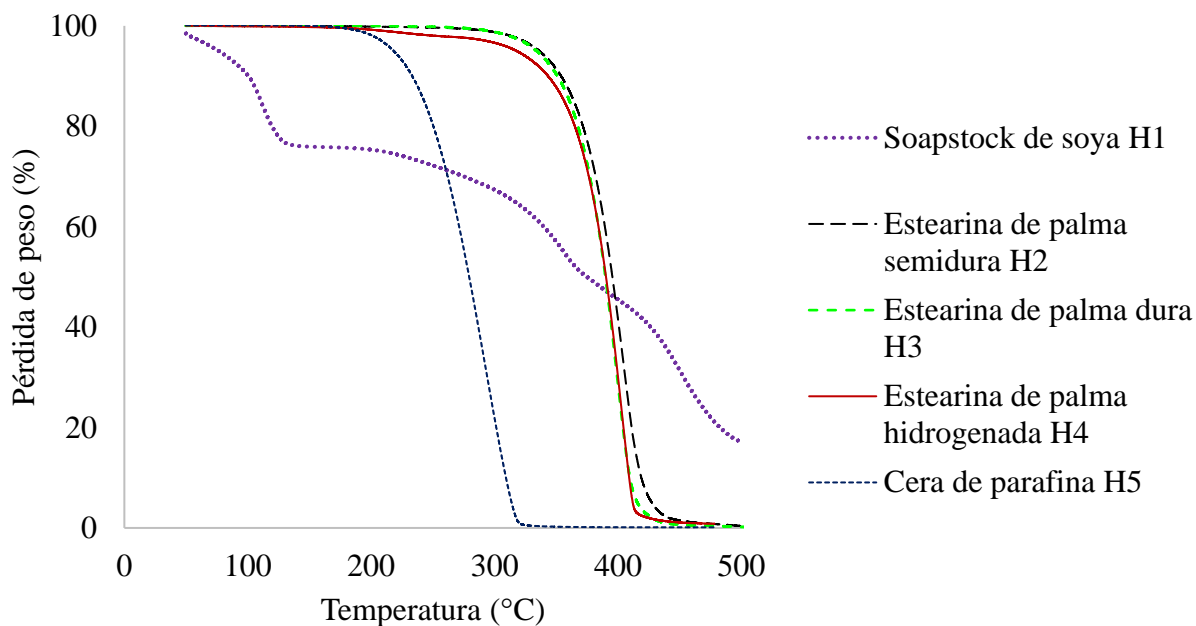
4.2.2. Estimación de propiedades térmicas: Temperatura y entalpía de fusión, temperatura y entalpía de cristalización, estabilidad térmica y capacidad calorífica de sólido y líquido.

Para el estudio de la estabilidad térmica se llevó a cabo un análisis termogravimétrico desde la temperatura ambiente hasta 500°C, con una velocidad de calentamiento de 5 °C/min y un flujo de nitrógeno de 50 ml/min para cada una de las muestras. La **figura 13** muestra el porcentaje de pérdida de masa en función de la temperatura de cada material.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Figura 13.

Porcentaje de pérdida de peso en función de la temperatura de cada material.



La anterior figura permite evidenciar la estabilidad térmica de cada material estudiado. Como se logra observar, el soap stock de soya (H1) es la muestra con menos estabilidad térmica, ya que la pérdida de masa se evidencia desde que esta empieza a aumentar su temperatura; Por otro lado, la estearina de palma semidura (H2) tiene una tendencia constante hasta los 203,11 °C; de igual manera, la estearina de palma dura (H3) y la estearina de palma hidrogenada (H4), tienen un comportamiento constante hasta los 245,53 °C y 123,63 °C respectivamente; finalmente, la parafina (H5) tuvo un comportamiento constante hasta los 169,09°C . En **tabla 5** se evidencia el punto donde inicia la degradación térmica y el punto de mayor velocidad de degradación de cada muestra estudiada (Ver apéndice C).

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Tabla 5.*Análisis TGA de las muestras.*

Muestra	Punto donde inicia la degradación térmica (°C)	Punto de mayor velocidad de degradación (°C)
Soapstock de soya H1	98	118
Estearina de palma semidura H2	373	420
Estearina de palma dura H3	369	411
Estearina de palma hidrogenada H4	371	413
Cera de parafina (de origen petroquímico) H5	246	309

La estearina de palma hidrogenada (H4), a diferencia de la parafina (H5), empieza su degradación térmica en 370,98 °C; adicionalmente, el punto de mayor velocidad de degradación es de 412,5 °C, este último también es mayor que el de la parafina. Por ende, se puede deducir que la estearina de palma hidrogenada tiene un comportamiento satisfactorio a comparación de los otros materiales estudiados.

Por otra parte, la determinación de la temperatura y entalpía de fusión, temperatura y entalpía de cristalización se hizo mediante Calorimetría Diferencial de Barrido.

En la **tabla 6**, se muestran las temperaturas y entalpías de fusión y las temperaturas y entalpías de cristalización de cada material estudiado (ver apéndice D).

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Tabla 6.*Temperaturas y entalpías de fusión y cristalización de los materiales estudiados*

Muestra	Punto de fusión (°C)	Entalpía de fusión (kJ/kg)	Punto de cristalización (°C)	Entalpía de cristalización (kJ/kg)
Estearina de palma semidura H2	50	124	27	38
Estearina de palma dura H3	54	44	31	62
Estearina de palma hidrogenada H4	48 59	234	43	201
Cera de parafina H5	57	172	53	193

Nota: Las muestras que presentan varios picos en el análisis DSC, evidencian la presencia de varios puntos de fusión y de cristalización, la suma de estos valores se tiene en cuenta en el potencial de acumulación; esto ocurre debido a la fusión o cristalización previa de algunas sustancias que hacen parte de la composición de los materiales.

De las muestras estudiadas, la que presenta el valor más alto de temperatura y entalpía de fusión es la estearina de palma hidrogenada (H4). Al comparar la estearina hidrogenada con la estearina dura y semidura, se puede observar el aumento en la temperatura de fusión y de cristalización, adicionalmente esta solo presenta un pico cuando se cristaliza.

Por otra parte, el Soap Stock de soya no presenta temperatura de fusión y cristalización definidas, por lo tanto, este material no se solidifica ni se fusiona completamente.

El análisis de las capacidades caloríficas se realizó mediante la técnica Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC). (ver apéndice E).

El cálculo de la capacidad de almacenamiento de energía de 1 kg de todas las muestras se realizó en un rango de 25-85 °C (rango de operación del sistema de almacenamiento). En el estado sólido y líquido se tuvo en cuenta la masa por el Cp (se asumió un valor constante) y la diferencia de temperatura en que se encuentra la fase. Adicionalmente se sumó la masa por la entalpía de fusión.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

La **tabla 7** muestra las capacidades caloríficas en estado sólido y líquido, la energía almacenada en el rango de operación del sistema de almacenamiento, y el costo de almacenamiento unitario COP de cada material estudiado.

Tabla 7.

Capacidades caloríficas, energía almacenada y costo de almacenamiento unitario de cada material.

Muestra	Capacidad calorífica en estado sólido (kJ/kg*K)	Capacidad calorífica en estado líquido (kJ/kg*K)	Energía almacenada (kJ)	Costo de almacenamiento (\$/kJ)
Estearina de palama semidura H2	0,002	0,84	137	53
Estearina de palma dura H3	0,02	0,94	71	102
Estearina de palma hidrogenada H4	0,029	1,62	270	38
Cera de parafina (origen petroquímico) H5	0,003	0,94	186	61

La ecuación 2 expone el cálculo del almacenamiento de energía en el rango de operación del sistema de almacenamiento para la estearina de palma hidrogenada.

$$E = \left(1 (kg) * 0,029 \left(\frac{kJ}{kg*K} \right) * (319 - 298)(K) \right) + \left(1 (kg) * 234 \left(\frac{kJ}{kg} \right) \right) + \left(1 (kg) * 1,62 \left(\frac{kJ}{kg*K} \right) * (358 - 336) \right) \quad (\text{Ec. 2})$$

$$E = 270 kJ$$

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Conclusiones

En el presente trabajo se estimó la producción anual de estearina de palma en Colombia la cual fue de 464.311 toneladas, teniendo un costo comercial de \$7.300 por kilogramo para el material sin hidrogenar y \$10.417 para el material hidrogenado. La producción nacional de estearina de palma se estableció con base en datos secundarios del sector palmero en Colombia, de acuerdo con esto se concluye que hay disponibilidad y viabilidad económica de estearina de palma; siendo este un material autóctono promisorio con respecto a la cera de parafina.

Se caracterizaron las propiedades térmicas y fisicoquímicas de la estearina de palma y de otros PCM, se evidenció que la estearina de palma hidrogenada cumple con las propiedades fisicoquímicas (densidad sólida de 1025 kg/m^3) y térmicas (punto de fusión y de cristalización de 59°C y 43°C respectivamente) requeridas para su aplicación como material de cambio de fase.

Se comparó el desempeño térmico de la estearina de palma y estearina de palma hidrogenada con el de otros materiales orgánicos de cambio de fase en un escenario teórico. La estearina de palma hidrogenada tuvo el mejor desempeño debido a su capacidad de almacenamiento energético (270 kJ/kg) y bajo costo unitario de almacenamiento ($38 \text{ \$/kJ}$).

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio sobre la vida útil y de sostenibilidad de la estearina de palma hidrogenada con el propósito de evaluar su durabilidad en su aplicación como material de cambio de fase en sistemas de almacenamiento de energía solar térmica.

Se recomienda realizar un análisis económico de todo el sistema de calefacción y agua sanitaria para evaluar a profundidad la viabilidad económica del proyecto.

Se recomienda estudiar los parámetros de hidrogenación para obtener un producto con mejores propiedades para su uso como PCM.

Referencias

- Alfa Laval. (2021). *Industria de alimentos procesado de grasas y aceite de palma* Alfa L. Company. <https://www.alfalaval.com.co/industrias/alimentos-lacteos-y-bebidas/procesado-de-alimentos/procesado-de-grasas-y-aceites/procesado-de-aceite-de-palma/>
- Balakos, M. & Hernández, E. (1997). Catalyst characteristics and performance in edible oil hydrogenation. *Catalysis Today* 35, 415-425. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(96\)00212-X](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(96)00212-X)
- Basu, P. (2018). Analytical Techniques. En Basu, P. (Ed), *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction* (pp.479-495). ACADEMIC PRESS. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/B978-0-12-812992-0.00023-6>
- Beatty, D. & Sparks, T. (2022). Differential Scanning Calorimetry. Department of Materials Science and Engineering. The University of Utah, Salt Lake City, UT. <https://www-jove-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/v/10487/differential-scanning-calorimetry>
- Bernal, G. (2005). Sinopsis del proceso de la palma de aceite. Editorial Noel Wambeck.
- Bravo, D. (2018). Una Revisión sobre Materiales para Almacenamiento de Energía Solar Térmica. *Ingeniería*, 23(2). <https://doi.org/10.14483/23448393.12510>
- Cadena, A. (2004). Fraccionamiento en seco de los aceites de palma y de palmiste y usos de las fracciones. *Palmas* 25 (2), 482-491.
- Chandrasekharan, N., Kalyana, N.; & S. (1999). *Aspectos nutricionales y de salud de la estearina de palma: percepciones y hechos** *Nutritional and health aspects of palm stearin: perceptions and facts.*

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

- Cheng, H., Dowd, M., Easson, M., & Condon, B. (2012). Hydrogenation of Cottonseed Oil with Nickel, Palladium and Platinum Catalysts. *American Oil Chemists' Society* (89), 1557-1566. <http://dx.doi.org/10.1007/s11746-012-2036-8>
- Choo, H., Liew, K., Liu, H., Seng, C., Mahmood, W. & Bettahar, M. (2003). Activity and selectivity of noble metal colloids for the hydrogenation of polyunsaturated soybean oil. *Journal of Molecular Catalysis* 191, 113-121. [https://doi.org/10.1016/S1381-1169\(02\)00351-5](https://doi.org/10.1016/S1381-1169(02)00351-5)
- Colomer, M. (2003). *Efectos antioxidantes del aceite de oliva y de sus compuestos fenólicos*. (Tesis Doctoral). Departamento de Medicina de la Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España.
- Cortés, S., Arango, A. (2017). Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía. *Revista ciencias estratégicas*, 25(38), 375-390. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=151354939007>
- Diemme Filtration (2010). *Refinación de aceites comestibles* A Brand of Aqseptence Group. <https://www.diemmefiltration.com/es/historias-de-exito/refinacion-de-aceites-comestibles/>
- El Khadraoui, A., Bouadila, S., Kooli, S., Farhat, A., & Guizani, A. (2017). Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM. *Journal of Cleaner Production*, 148, 37-48. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.jclepro.2017.01.149>
- Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite (2022). “*El pamicultor*” Fedepalma. <https://web.fedepalma.org/>

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2021). *La palma de aceite en Colombia*.

<https://web.fedepalma.org/sites/default/files/files/Infografi%CC%81a%20Colombia%202021%20en%20Espan%CC%83ol.pdf>

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2022). *Evolución histórica en los últimos 5 años de la producción de aceite*. <http://sispaweb.fedepalma.org/sispaweb/>

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. (2022). *Evolución histórica del rendimiento de aceite*. <http://sispaweb.fedepalma.org/sispaweb/>

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. “El palmicultor”. Fedepalma.org. <https://web.fedepalma.org/> (Accedido: 22/02/2022).

Food and Drug Administration (2015). *La FDA pone un alto a las grasas trans en los alimentos procesados* <https://www.fda.gov/consumers/articulos-en-espanol/la-fda-pone-un-alto-las-grasas-trans-en-los-alimentos-procesados>

García, J. (2012). *Materiales de Cambio de Fase. Diseño de una instalación para la caracterización de PCM a altas temperaturas*. (tesis de pregrado). Universidad Zaragoza, Zaragoza, España.

Gibon, V., Greyt, W. & Kellens, M. (2007). Palm oil refining. *European Journal of Lipid Science and Technology* 109, 315-335. DOI 10.1002/ejlt.200600307

Gottschalk, P., Brodesser, B., Poncelet, D., Jaeger, H., Rennhofer, H. & Cole, S. (2018). Formation of essential oil containing microparticles comprising a hydrogenated vegetable oil matrix and characterisation thereof. *Journal of Microencapsulation* 35(6), 513-521. <https://doi.org/10.1080/02652048.2018.1515998>

Haines P., Reading, M., & Wilburn, F. (1998). Differential thermal analysis and differential scanning calorimetry. *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1, 239-354.

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Hamm, W., Hamilton, R. & Calliauw, G. (2013). Edible Oil Refining: Current and Future Technologies. En Greyt, W. (Ed.). Edible Oil Processing (pp. 127-150). Wiley-Blackwell.

Hegsted, M. y Joyce Beare, R. (1997). *Elaboración y refinado de aceites vegetales comestibles, grasas y aceites en la nutrición humana*.
<https://www.fao.org/3/V4700S/v4700s00.htm#Contents>

Herrera, A., Fabián, C., Ramírez, Q., Andrés, R., Muñoz, L., & Gilberto, L. (2019). *Aceite híbrido fortuna*.

Huang, X., Alva, G., Liu, L. & Fang, G. (2017). Preparation, characterization and thermal properties of fatty acid eutectics/bentonite/expanded graphite composites as novel from-stable thermal energy storage materials. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 166 (2017), 157-166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2017.03.026>

Iten, M., Liu, S., & Shukla, A. (2016). A review on the air-PCM-TES application for free cooling and heating in the buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 175-186.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.007>

Jegadheeswaran, S., & Pohekar, S. D. (2009). Performance enhancement in latent heat thermal storage system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(9), 2225-2244. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.rser.2009.06.024>

Jianzhong, X., Caihong, L., Hongqiang, Q., Haiyun, M., Yunhong, J. & Jixing, X. (2013). Investigation on the thermal degradation of flexible poly(vinyl chloride) filled with ferrites as flame retardant and smoke suppressant using TGA-FTIR and TGA-MS. *Polymer Degradation and Stability* 98(8), 1506-1514. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.polymdegradstab.2013.04.016>

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

- Jovanovic, D., Radovic, R., Mares, L., Stankovic, M., & Markovic, B. (1998). Nickel hydrogenation catalyst for tallow hydrogenation and for the selective hydrogenation of sunflower seed oil and soybean oil. *Catalysis Today*, 43(1), 21-28. [https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/S0920-5861\(98\)00133-3](https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/S0920-5861(98)00133-3)
- JoVE Science Education Database (Productor) (2022). *Differential Scanning Calorimetry*. <https://www-jove-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/v/10487/differential-scanning-calorimetry>
- JoVE Science Education Database (Productor) (2022). *Infrared Spectroscopy*. <https://www-jove-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/v/10351/infrared-spectroscopy>
- Kubasch, C. Shumacher, H., Ruelke, H., Mayer, U. & Bartha, JW. (2011). Fourier Transform Infrared Spectroscopy of Moisturized Low Dielectric Materials. *Transactions on Electron Devices* (58)9, 2888-2894. doi: [10.1109/TED.2011.2159506](https://doi.org/10.1109/TED.2011.2159506)
- LegisComex. (2022). *La exportación de aceite de palma en Colombia*. <https://blog.legis.com.co/comercio-exterior/exportacion-aceite-palma-colombia>
- Lorena, J., Garcia, C., Alexander, R., & Diaz. (2017). *diseño conceptual de una planta piloto para el proceso de refinación de aceite crudo para uso alimenticio* (Tesis de pregrado). Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia.
- Matthäus, B. (2007). Use of palm oil for frying in comparison with other high-stability oils. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 101(4), 400-409. DOI 10.1002/ejlt.200600294
- Mayo, D., Miller, F. & Hannah, R. (2004). Course Notes of the Interpretation of Infrared and Raman Spectra. https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=rX2aofK_6LMC&oi=fnd&pg=PR7&

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

[ots=8a8Hqw3QbF&sig=eG5LlQe36RI4zszUCUegzIE_JeU&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.097)

Muñoz, Y., & Mantilla, E. / Fedepalma. (2017). *Estudio de pre factibilidad de la instalación de una planta de fraccionamiento de aceite de palma en Colombia.*

Nieto, V. y Calderón, G. (2018). Cadena productiva de productos oleaginosos, grasas y aceites. Departamento Nacional de Planeación (DNP).
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Economicos/470.pdf>

Nusantoro, B. P. (2016). Dry Fractionation of RBD (Refined Bleached and Deodorized) Palm Oil. *Agritech*, 27(4)10.22146/agritech.9858.

O'Brien, R. (2003). *Fats and oils: Formulating and Processing for Applications.*
<https://doi.org/10.1201/9780203483664>

O'Brien, R. (2009). *Fats and oils formulating and processing.* CRC Press

Oliver, A., Neila, F. & García, A. (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. *Materiales de Construcción*, 62(305), 131–140. doi: 10.3989/mc.2012.58010.

Ooi, C. K., Choo, Y. M., Yap, S. C., & Ma, A. N. (1996). *Refinación de aceite de palma rojo Elaeis (Malasia).*

Pereira da Cunha, J., & Eames, P. (2016). Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review. *Applied Energy*, 177, 227-238.
<https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.apenergy.2016.05.097>

Pereira da Cunha, J., & Eames, P. (2016). Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials – A review. *Applied Energy*, 177, 227-238. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.apenergy.2016.05.097>

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

- Pop, O. G., & Balan, M. C. (2021). A numerical analysis on the performance of DHW storage tanks with immersed PCM cylinders. *Applied Thermal Engineering*, 197, 117386. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.applthermaleng.2021.117386>
- Ravisankar, R., Naseeruthee, A., Rajalakshmi, A., Annamalaid, G. & Chandrasekaran, A. (2014). Application of thermogravimetry-differential thermal analysis (TG-DTA) technique to study the ancient potteries from Vellore dist, Tamilnadu, India. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 129, 201-208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.saa.2014.02.095>
- Reyes A, Henríquez-Vargas L, Aravena R, Sepúlveda F. Experimental analysis, modeling and simulation of a solar energy accumulator with paraffin wax as PCM. *Energy Conversion and Management* 2015; 105:189-196.
- Reyes, A., Henríquez-Vargas, L., Aravena, R., & Sepúlveda, F. (2015). Experimental analysis, modeling and simulation of a solar energy accumulator with paraffin wax as PCM. *Energy Conversion and Management*, 105, 189-196. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.enconman.2015.07.068>
- Rice, C. Miller, N., Paganga, G. (1996). Structure-antioxidant activity relationship of flavonoids and phenolic acids. *Free Radic Biol Med* 20(7), 56-933.
- Rodríguez-Cumplido, F., Pabón-Gelves, E., & Chejne-Jana, F. (2019). Recent developments in the synthesis of microencapsulated and nanoencapsulated phase change materials. *Journal of Energy Storage*, 24, 100821. <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.est.2019.100821>
- Sáiz, L. (1991). Análisis sobre el almacenamiento térmico en la edificación. *Informes de la construcción* 43(416), 81-95. <https://doi.org/10.3989/ic.1991.v43.i416.1366>

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Sarno, M., Iuliano, M., Vicsusi, G., Zarli, A. & Ciambelli, P. (2021). A Nickel/ Palladium/- Graphene based nanocatalyst for selective catalytic hydrogenation of vegetable oils.

Industrial Crops & Products 170. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113815>

Suriñach, S., Baro, M., Bordas, S., Clavaguera, N., & Clavaguera, M. (1992). La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la Ciencia de Materiales. *Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr.* 31(1), 11-17.

Theam, K. L., Islam, A., Choo, Y. M., & Taufiq-Yap, Y. H. (2015). Biodiesel from low cost palm stearin using metal doped methoxide solid catalyst. *Industrial Crops and Products*, 76, 281-289. [https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.indcrop.2015.06.058](https://doi.org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/j.indcrop.2015.06.058)

Torres-Gallo, R., Miranda-Lugo, P., & Martínez-Padilla, K., (2017). Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico, para secado de yuca. *TecnoL*. [online]. 2017, (20) 39, pp.71-83. ISSN 0123-7799.

Unipalma S.A. (2022). *Importancia del aceite y la estearina de palma como materia prima para la fabricación de jabón*. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/233/233/>

Unipalma. “Importancia del aceite y la estearina de palma como materia primapara la fabricación de jabón”. Fedepalma.org. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/233/233/> (Accedido: 22/02/2022).

Yang, J. & Hedin, N. (2022). Advances of lab-scale analytical methods for solidification/stabilization technologies. En Tsang, W. & Wang, L. (Eds), *Low Carbon*

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes (pp.483-495). <https://doi-org.bibliotecavirtual.uis.edu.co/10.1016/B978-0-12-824004-5.00006-2>

Zalamea, E., & Quesada, F. (2017). Criterios de integración de energía solar activa en arquitectura. Potencial tecnológico y consideraciones proyectuales. *Revista de Arquitectura*, 19(1), 56-69. doi:<http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2017.19.1.1018>

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Apéndice

Apéndice A.

Cotizaciones de parafina y estearina de palma.

G&R COMERCIALIZADORA S.A.S.
 NIT.900.975.595-9 RESPONSABLE DE IVA
 CL 33 16 59 BRR CENTRO
 TEL. (037)642 32 52 - (037)670 74 08 CEL. 321 324 6235
 BUCARAMANGA SANTANDER
 E-MAIL: ventas@quimicos2.com



COTIZACION

Cliente : CHINOME ASHLEY GISSELA		156
C.C. ó Nit: 19191919-6	Telefonos: -	Fecha : 13/06/2022
Dirección: bucamanga		Válida Hasta: 13/06/2022
Detalle :		Ciudad: BUCARAMANGA, SANTANDER

CODIGO	DESCRIPCION	REFERENCIA	CANTIDAD	PRECIO	TOTAL
003804	PARAFINA 58-60 X KG		500	9,663	4,831,932

Son: Cinco Millones Setecientos Cincuenta Mil Pesos M/CTE

Asesor: VENTAS DE MOSTRADOR Forma de Pago : CONTADO		SUB-TOTAL:	4,831,932
ACEPTADA:		DESCUENTO:	0
_____		IVA:	918,067
C.C. ó NIT/ SELLO		TOTAL:	5,750,000

USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE



Yumbo, Enero 25 de 2022

N

Señores:

**Universidad Industrial de Santander.
Bucaramanga.**

REF: FACTURA PROFORMA: 3899- 2021

De acuerdo con su amable solicitud, estamos enviando la siguiente factura pro forma:

PRODUCTO	CANTIDAD	V/R. UNITARIO	V/R. TOTAL
Maquila Hidrogenación de Estearina de Palma. Según especificaciones solicitadas por la Universidad-	1.000 kg	10.417 \$	\$10.417.000
Maquila Hidrogenación de Estearina de Palma. Según especificaciones solicitadas por la Universidad-	600 kg	10.417 \$	\$6.250.200

CONDICIONES COMERCIALES:

VALIDEZ DE LA OFERTA: 60 días
TIEMPO DE ENTREGA: 28 febrero - 2022
TÉRMINOS DE PAGO: Crédito
UNIDAD EMPAQUE: Sacos X 25 kg.
IVA: 19% Incluido
LUGAR ENTREGA: Bucaramanga.

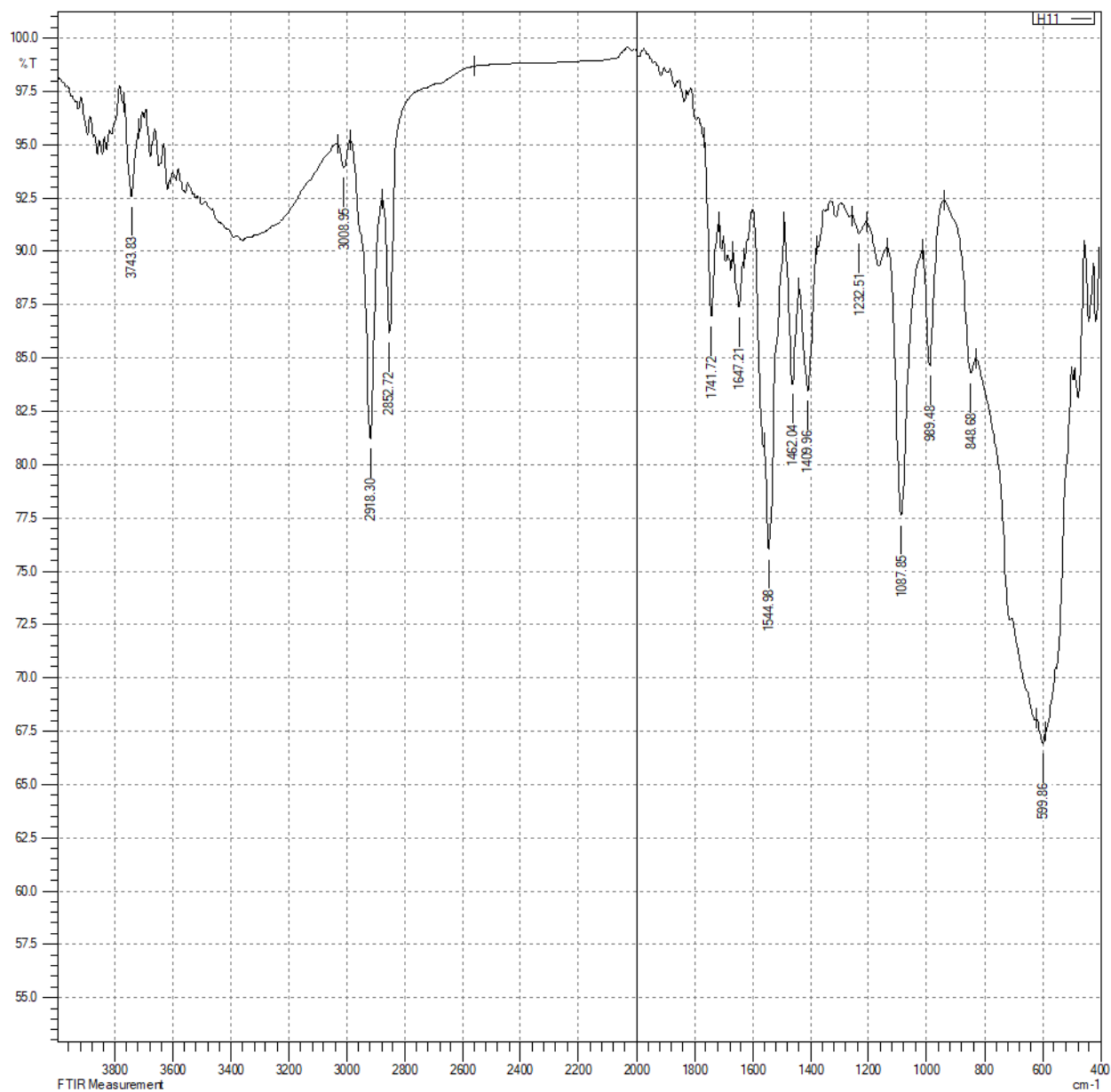
Atentamente,

CESAR AUGUSTO GOMEZ GALLEGO
 Coordinador de Negocios Internacionales
 E-mail: cgomez@protecnicaing.com

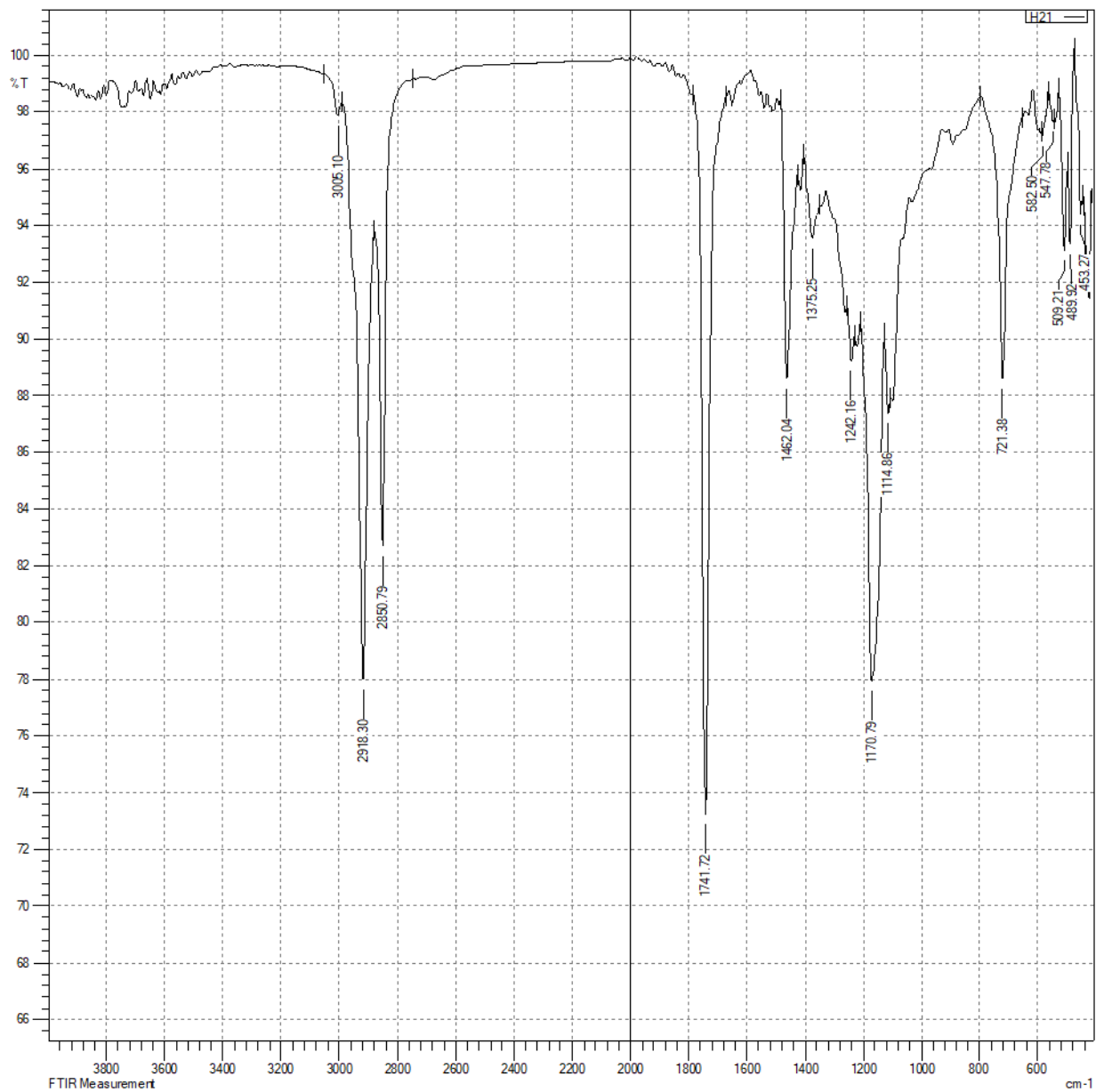
USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

Apéndice B.

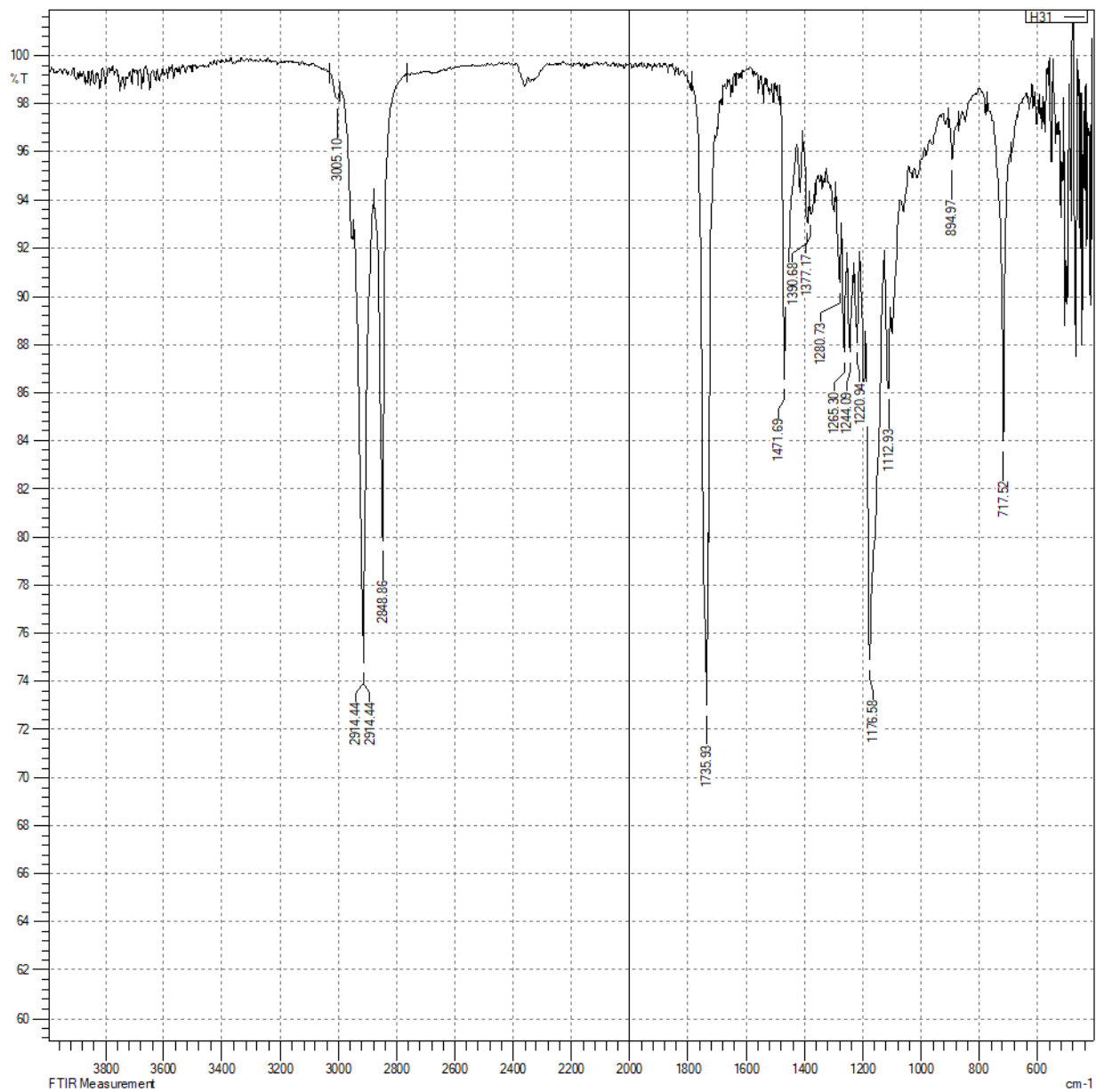
Análisis FTIR de los materiales estudiados



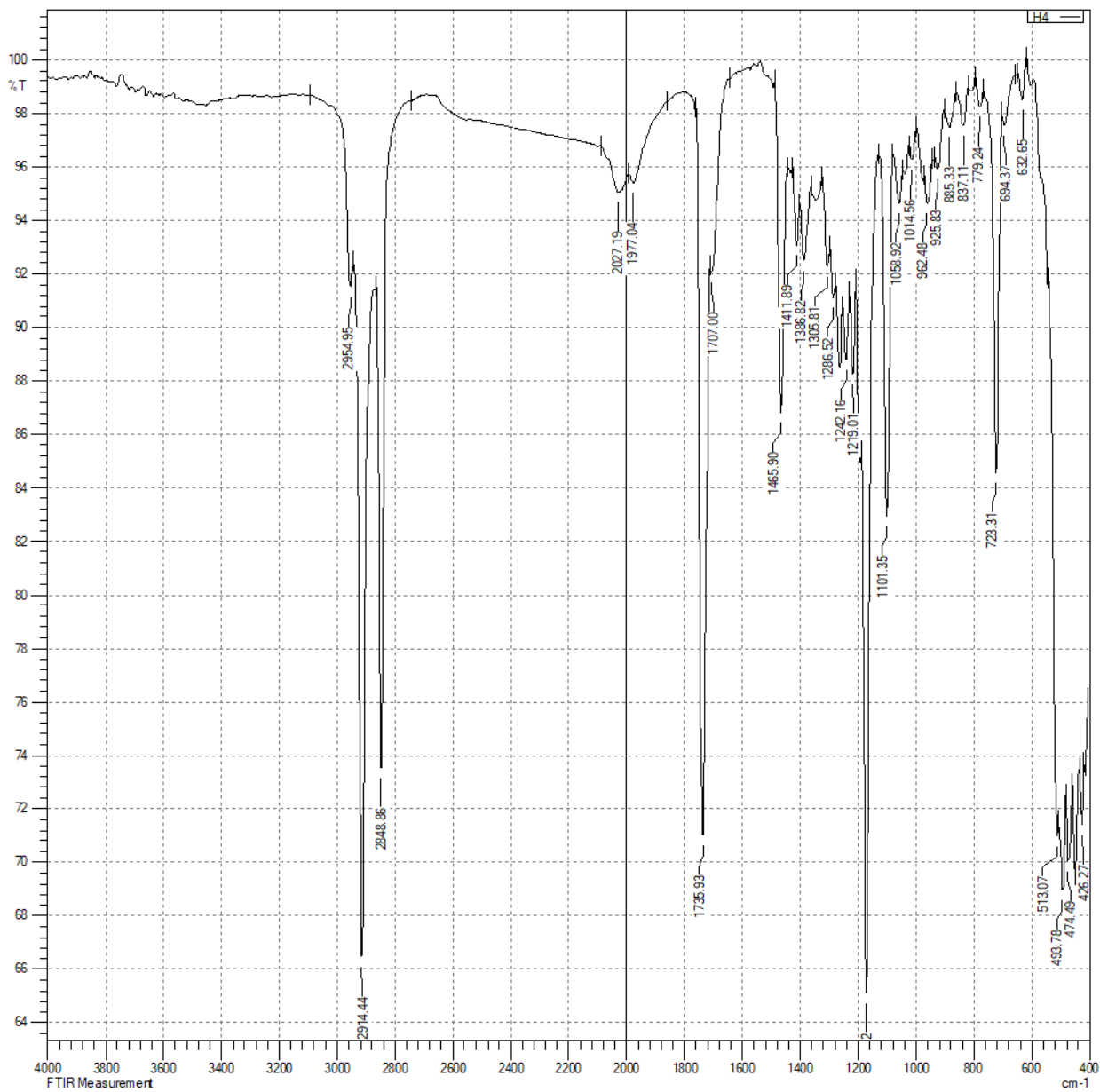
USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE



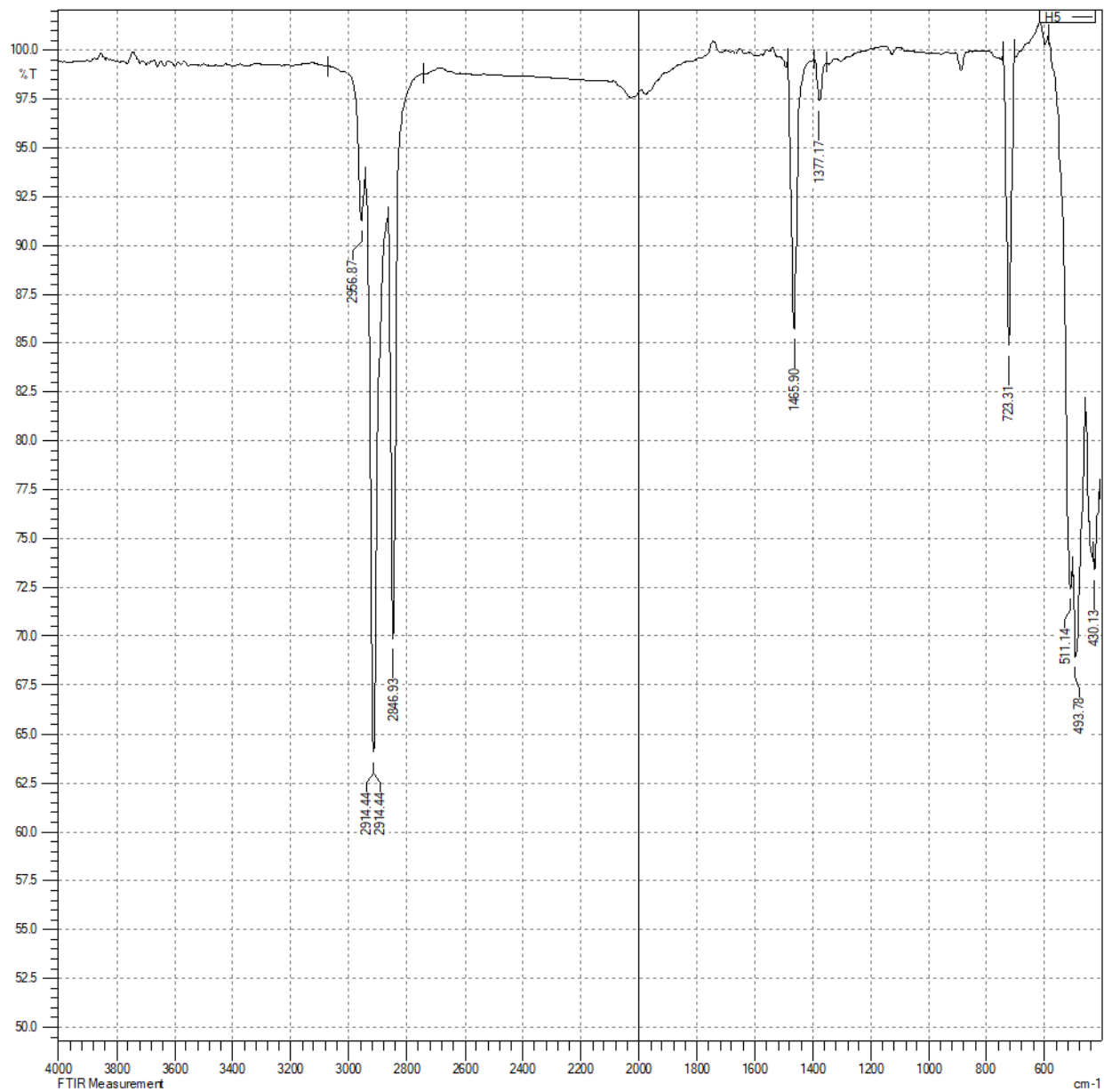
USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE



USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE



USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

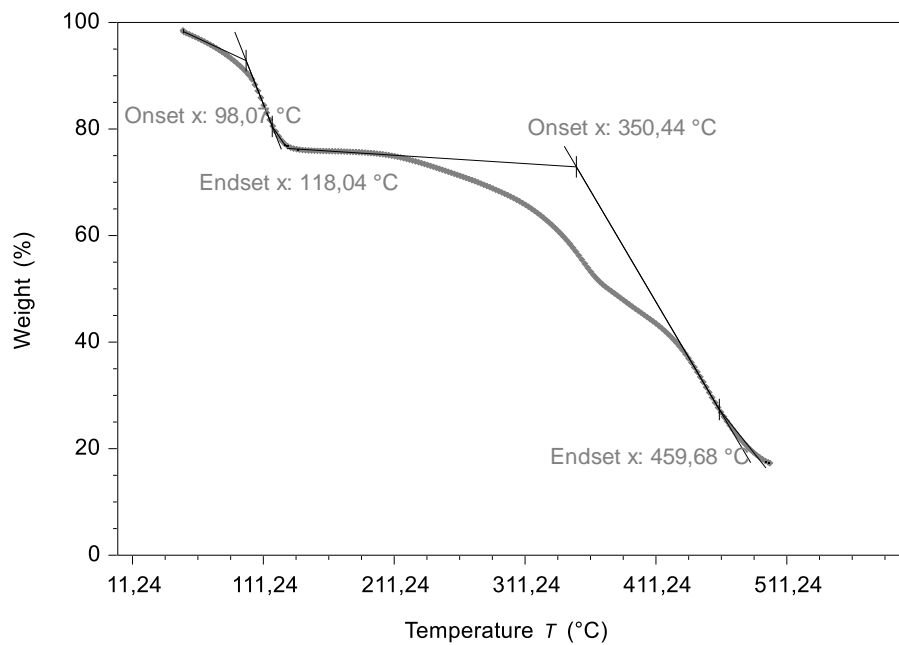


USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

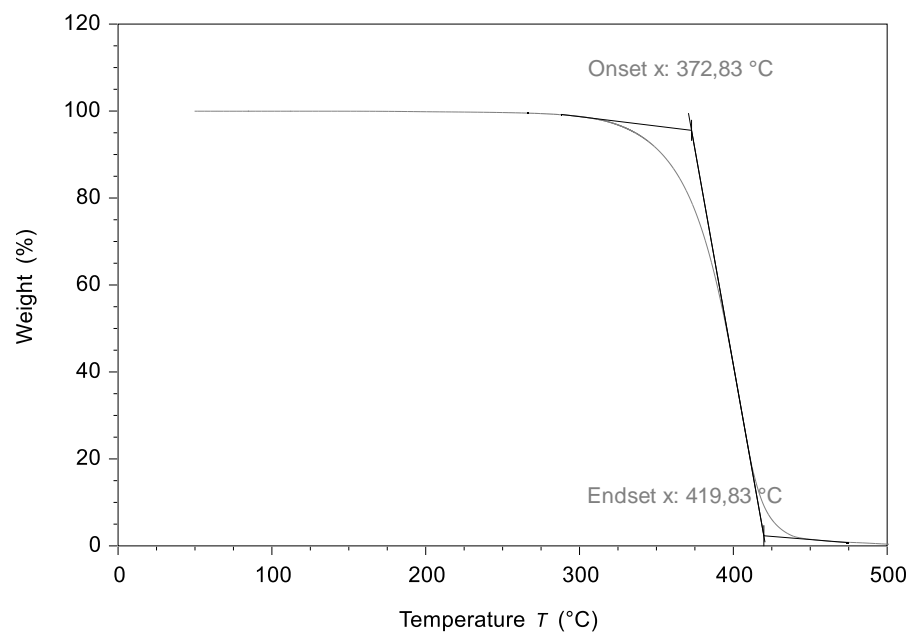
Apéndice C.

Análisis TGA de los materiales estudiados

H1

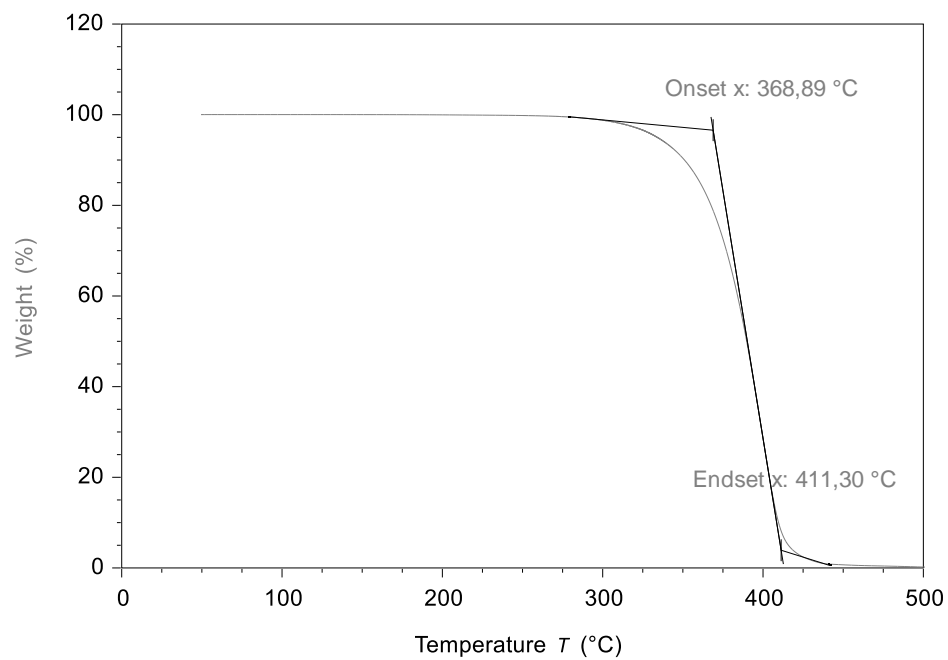


H2

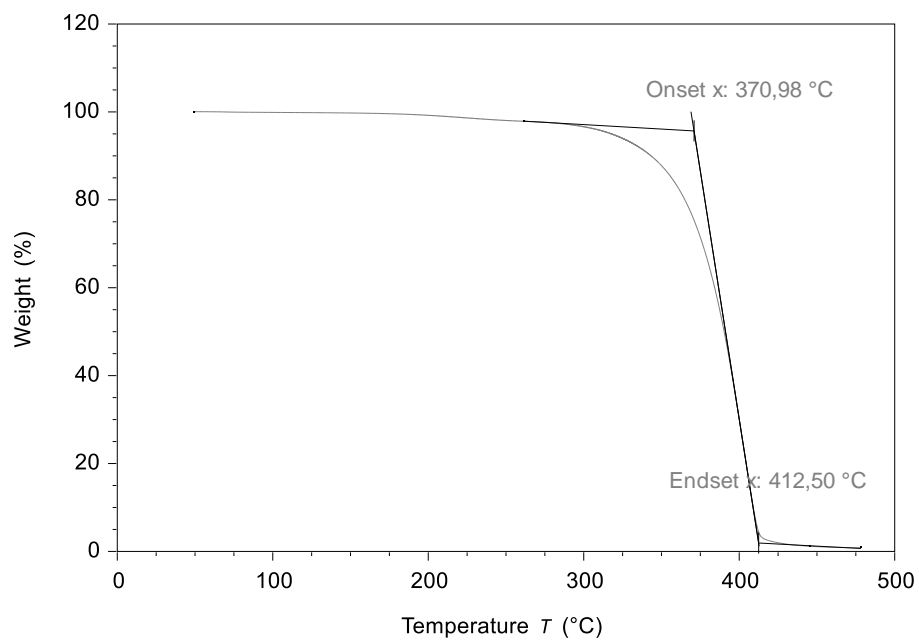


USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

H3

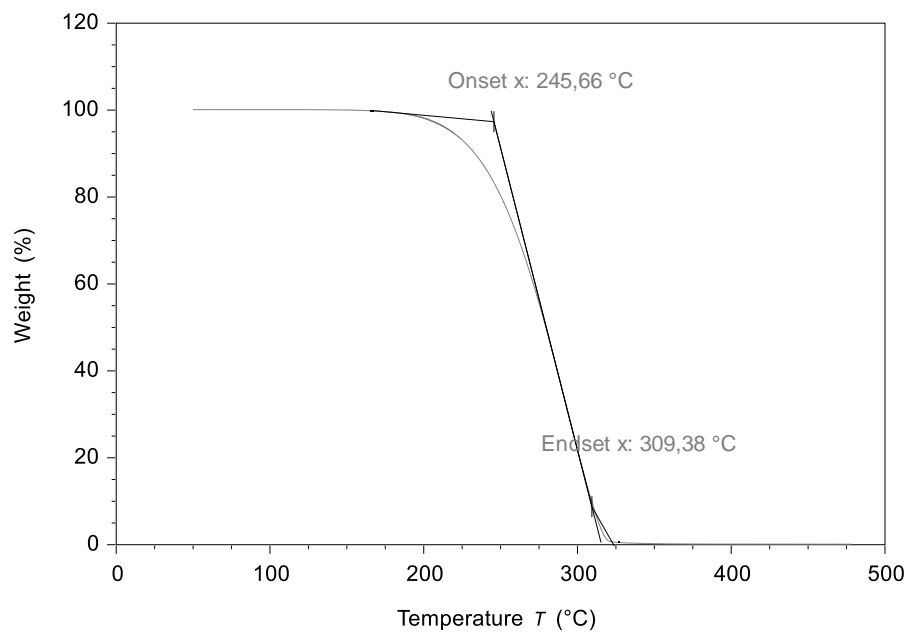


H4

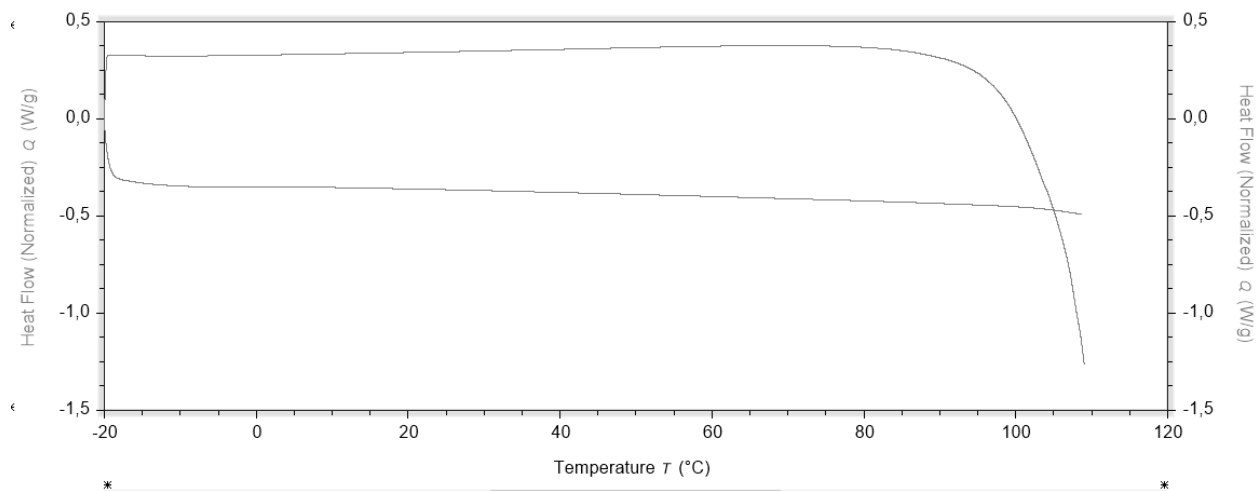


USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

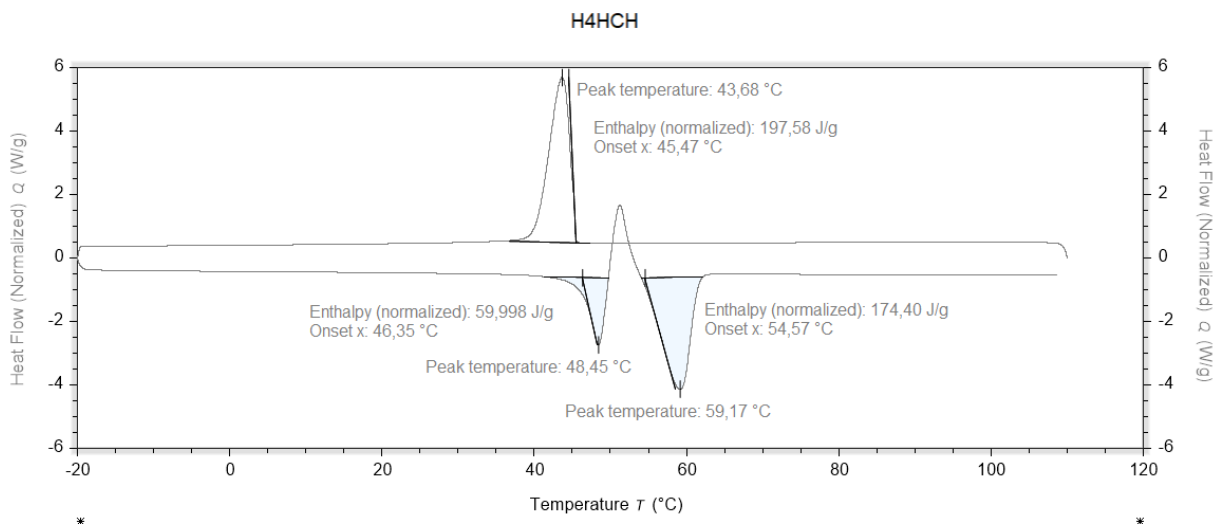
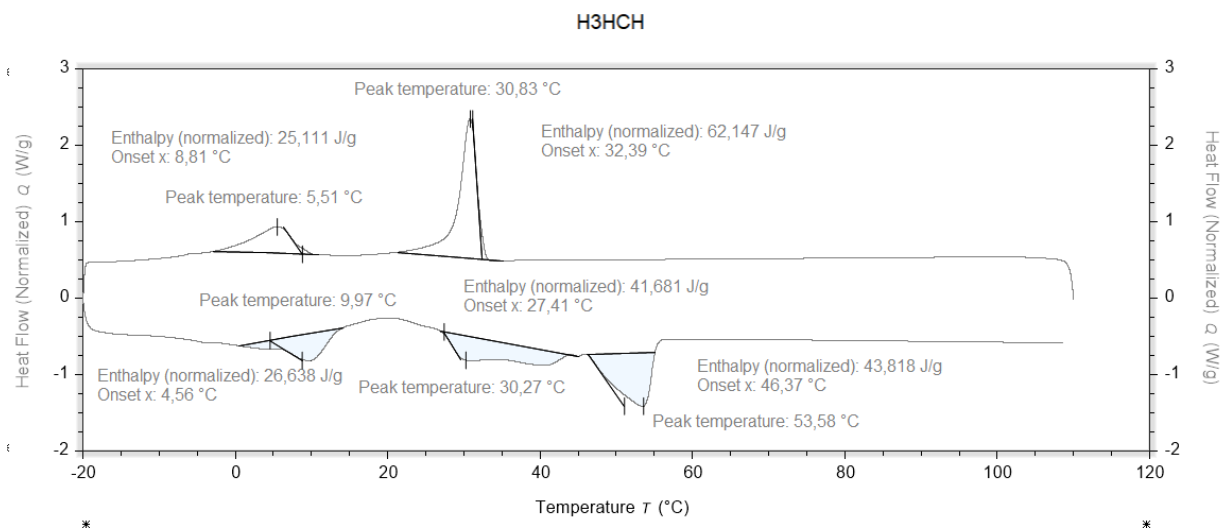
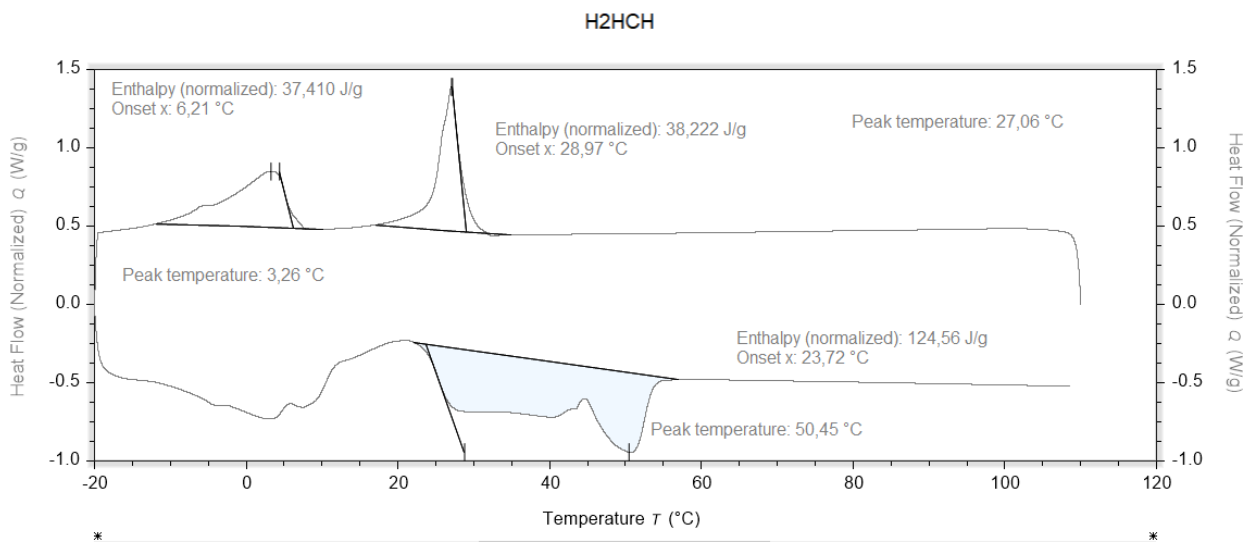
H5

**Apéndice D.***Análisis DSC de los materiales estudiados*

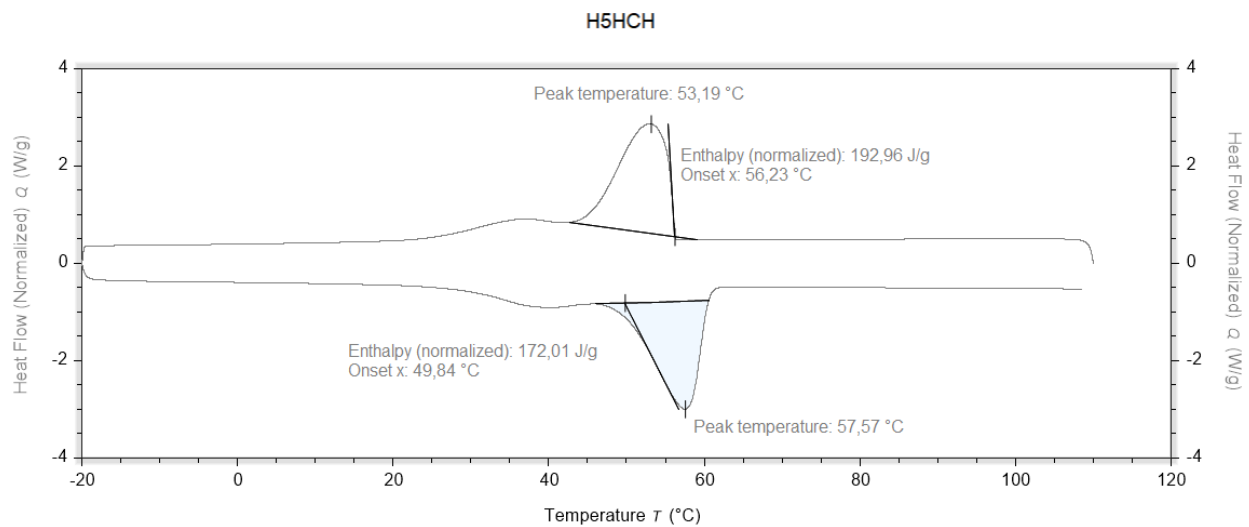
H1HCH



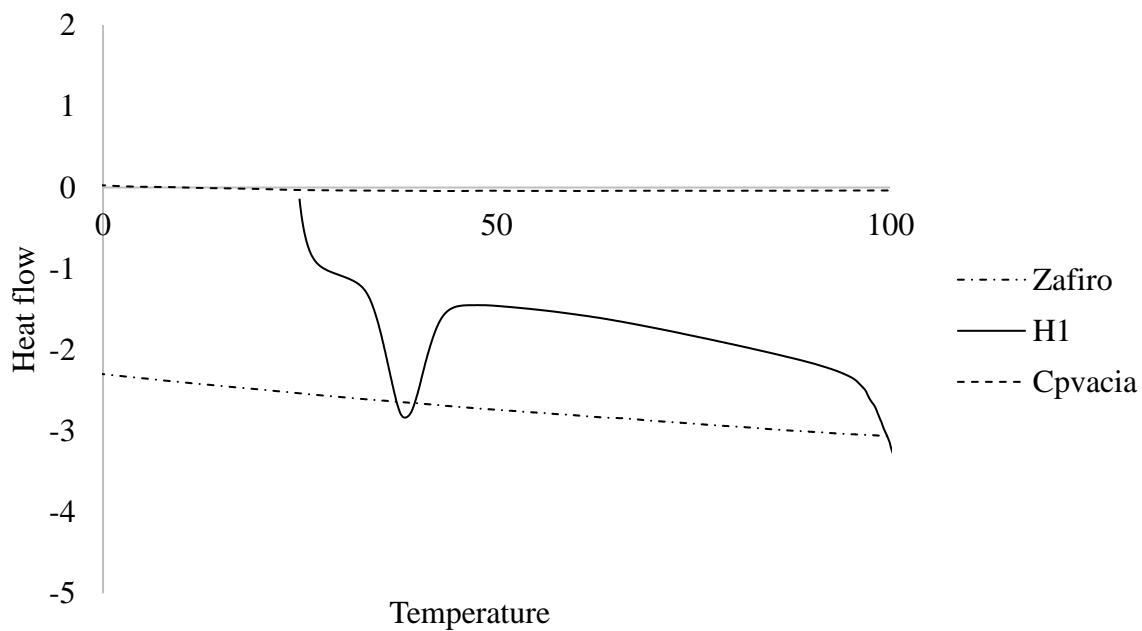
USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE



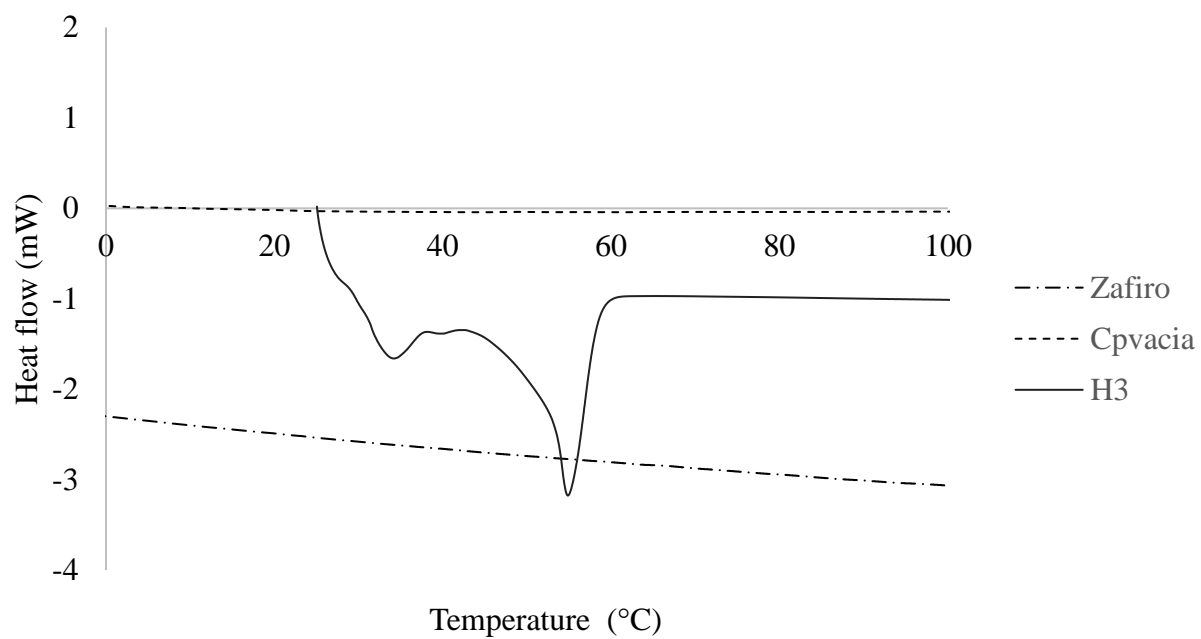
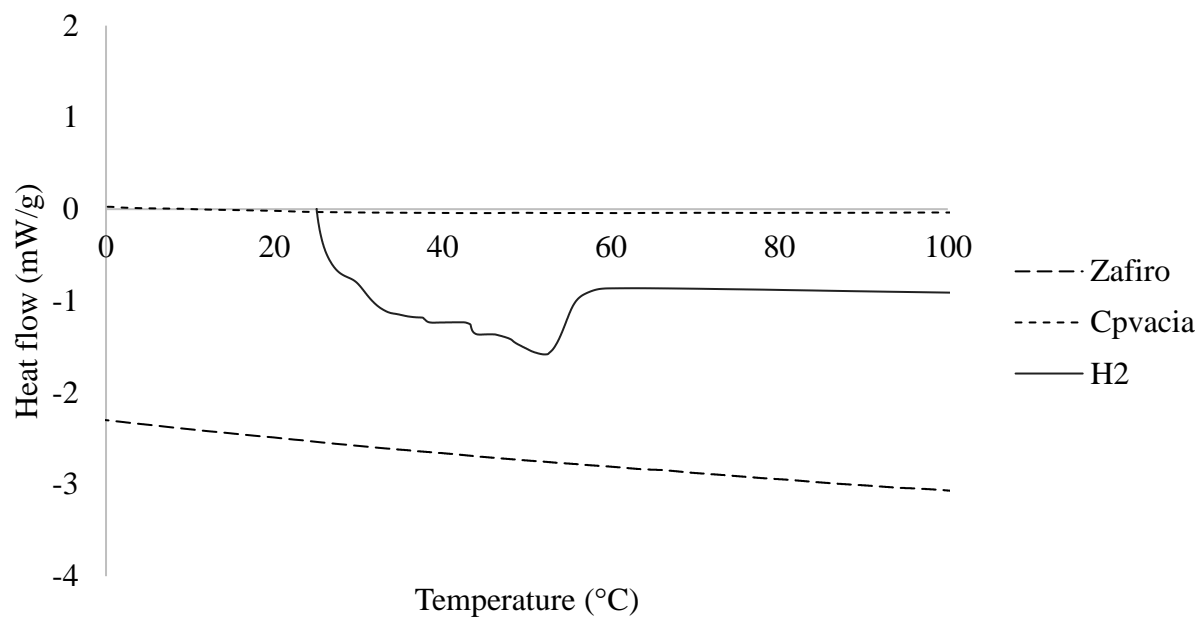
USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

**Apéndice E.**

Análisis DSC para el cálculo de C_p de cada muestra estudiada



USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE



USO DE ESTEARINA DE PALMA COMO MATERIAL DE CAMBIO DE FASE

